



**Universidad**  
Zaragoza

# Proyecto Fin de Carrera

## **Absorción de energía en estructuras de material compuesto.**

Marcos Colungo Torrecilla

Dirección:

**Dr. Luis Castejón Herrer**

Codirección:

**Dr. Olivier Dorival**

Dpto. Ingeniería Mecánica  
Universidad de Zaragoza

Dpto. Ingeniería Mecánica  
Instituto Clément Ader e Instituto de  
Ciencias Aplicadas de Toulouse

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Septiembre 2015



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
**Universidad** Zaragoza



INSTITUT NATIONAL  
DES SCIENCES  
APPLIQUÉES  
TOULOUSE



*A mi familia y en especial a mis padres; por su esfuerzo,  
su apoyo y por haberme dado la oportunidad de  
empezar a labrarme el futuro que deseo.*

# **Absorción de energía en estructuras de material compuesto.**

## **Resumen**

---

La realización de modelos informáticos de análisis de piezas en etapas anteriores y posteriores al prototipado, es una práctica muy utilizada en el ámbito de la ingeniería mecánica. Entre las ventajas de la utilización de este tipo de elementos aparecen los campos de la reducción de costes, optimización del tiempo, etc. Desde el Instituto Clément Ader (ICA) en Toulouse (Francia), se trabaja conjuntamente con la empresa Airbus Helicopters, filial de la gran aeronáutica Airbus S.A.S., en un proyecto conjunto para la fabricación de palas de helicópteros de material compuesto.

El punto de evolución en el que se sitúa el proyecto requiere de la creación de un modelo de análisis por elementos finitos que pueda representar el comportamiento real de los diseños ya elaborados. Estos modelos se dedicarán a la implementación de ensayos dinámicos de impacto utilizados en la caracterización de los diseños en trabajo paralelo con los prototipos fabricados.

El trabajo aportado en el siguiente documento tiene dos vertientes. La primera, de corte más experimental, aglutina diferentes tipos de experimentación, desde la realización de análisis de la capacidad de absorción de energía de impacto, tanto de alta velocidad (ensayos de tiro con cañón) como de baja velocidad (ensayos de Crushing); hasta la realización de la caracterización del material utilizado en el núcleo de espuma de las estructuras de material compuesto que formarán los diseños de palas de helicóptero.

La segunda, en cambio, tiene un desarrollo enteramente informático en tareas de modelización. El objetivo de este apartado será la representación a partir de un modelo informático del comportamiento real de la espuma Rohacell 71XT, presente en los diseños de palas del proyecto. Se partirá de un diseño anterior a partir de elementos 3D con un alto coste computacional el cual se desea optimizar en tiempo y capacidad de respuesta. Para la realización de esta tarea, se creará una estructura de elementos 1D que busca asemejar la configuración de la microestructura real. El estudio posterior se centrará en la reproducción de la respuesta de este tipo de material ante una sollicitación externa de compresión, mediante la aplicación de propiedades en el modelo creado, dejando el resto de sollicitaciones para trabajos futuros.

Para finalizar, serán detallados los resultados y conclusiones extraídos de este trabajo, así como las posibles mejoras y acciones futuras a realizar.



**Esquema de contenidos**

# Índice temático

## Capítulo 1:

<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto .....	1
1.2 Motivación .....	1
1.3 Objetivos .....	2
1.4 Estado del arte. Absorción de energía en estructuras de material compuesto.....	3
1.4.1 Impacto. Mecanismos de ruina de estructuras de material compuesto .....	3
1.4.2 Trabajos sobre la espuma Rohacell® .....	5
1.4.3 Trabajos previos sobre el modelado de la espuma.....	8
1.4.5 Entorno informático .....	10
1.5 Organización de la memoria .....	11
<b>Caracterización del comportamiento de la espuma Rohacell ® .....</b>	<b>12</b>
2.1 Presentación del material.....	12
2.1.1 Características mecánicas. Rohacell® 71XT.....	13
2.1.2 Comportamiento de la espuma.....	14
2.2 Ensayado de la espuma.....	15
2.2.1 Normativa de ensayo.....	15
2.2.2 Preparación de las probetas .....	16
2.2.3 Preparación del equipo de ensayo .....	18
2.2.4 Resultados del ensayo .....	20
2.2.5 Conclusiones .....	21
<b>Modelización del comportamiento de la Rohacell® 71XT .....</b>	<b>24</b>
3.1 Antecedentes en torno a la modelización de este material .....	24
3.2 Modelo discreto para representación de materiales de comportamiento heterogéneo .....	25
3.2.1 Nuevo modelo basado en particiones de Voronoi.....	26
3.3 Desarrollo del nuevo modelo de espuma. Elementos 1D .....	27
3.3.1 Creación del modelo discreto .....	27
3.3.2 Introducción de características. Selección del tipo de elemento.....	29
3.4 Modelización de la respuesta .....	31
3.4.1 Estrategia de modelización .....	31
3.4.2 Introducción de propiedades en el modelo.....	32
3.4.3 Modelización de la zona lineal .....	34
3.4.4 Modelización de la zona plana .....	35
3.4.5 Modelización de la densificación .....	37
3.4.6 Curva resultado .....	40
3.4.7 Comparativa con otros modelos .....	40
3.4.8 Conclusiones. Comparación de la respuesta del modelo discreto con la real.....	42
3.5 Conclusión de la fase de modelado .....	43
<b>Perspectivas .....</b>	<b>44</b>
4.1 Ensayos Arcan .....	44
4.2 Mejora de la modelización a partir de modelos avanzados.....	45
4.3 Modelo simplificado de estudio. Unión espuma-tejido compuesto .....	46
<b>Otros trabajos .....</b>	<b>47</b>
5.1 Ensayo tiro con cañón .....	47

5.1.1 Presentación del ensayo .....	48
5.1.2 Instalación del ensayo .....	49
5.1.3 Preparación previa al ensayo .....	50
5.1.4 Material ensayado y recuperación de resultados .....	52
5.1.5 Análisis energético .....	53
5.1.6 Resumen de resultados .....	58
5.1.7 Análisis tomográfico .....	60
5.2 Ensayo de Crushing .....	61
5.2.1 Presentación del ensayo .....	61
5.2.2 Instalación del ensayo .....	62
5.2.3 Resultados .....	63
<b>Conclusiones generales .....</b>	<b>65</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>68</b>

# Índice de figuras

Figura 1. Representación de las zonas de aparición de los mecanismos de ruina .....	4
Figura 2. Mecanismos de rotura y propagación .....	4
Figura 3. Detalle microestructura Rohacell 51WF .....	6
Figura 4. Definición de curva de comportamiento plano .....	6
Figura 5. Curvas de respuesta mecánica R51WF (Compresión, cizalladura y tracción) .....	7
Figura 6. Curvas de respuesta mecánica serie R WF (Compresión, cizalladura y tracción) .....	7
Figura 7. Diseños de sección de pala de rotor de helicóptero.....	8
Figura 8. Modelización de los elementos que forman la pala .....	9
Figura 9. Estructura de octaedros virtual para identificación de propiedades mecánicas .....	9
Figura 10. Estructura regular inicial y mallage perturbado a partir del antiguo código.....	9
Figura 11. Detalle estructural de la espuma Rohacell 71XT .....	12
Figura 12. Partes de la curva de respuesta en compresión .....	14
Figura 13. Bloque de espuma R71XT para experimentación.....	15
Figura 14. Proceso de creación de probetas cilíndricas.....	17
Figura 15. Máquina multiensayo Instron y osciloscopio Yokohama DL708E .....	18
Figura 16.Colocación de la cámara para el registro por imágenes .....	19
Figura 17. Evolución del ensayo de compresión y curva de respuesta. REF: H32D38-1.....	20
Figura 18.Detalle estructura alveolar de la espuma Rohacell .....	25
Figura 19. Red CFC, partición de Voronoi asociada y mallado creado .....	26
Figura 20. Dimensiones modelo de espuma discreto y modelo de corte en Abaqus.....	28
Figura 21. Modelos de espuma discreta para tamaños medios de arista de 1; 1,5 y 2mm .....	28
Figura 22. Composición del modelo final .....	29
Figura 23. Partes del modelo discreto .....	33
Figura 24. Modelización zona lineal de la curva .....	34
Figura 25. Modelización zona plana de la curva .....	35
Figura 26. Forma de la función de comportamiento .....	36
Figura 27.Modelización zona de densificación .....	37
Figura 28. Montaje Arcan multi-solicitación .....	45
Figura 29. Nueva división de las celdas creadas .....	45
Figura 30. Esquema del montaje del ensayo “Tiro con cañón” .....	48
Figura 31. Colocación de las probetas de ensayo en disparos a 0 y 45º .....	49
Figura 32. Montaje del ensayo con los cañones y la cámara de seguridad.....	49
Figura 33. Disposición de cámaras de alta velocidad y planos de calibración .....	50
Figura 34. Preparación de proyectiles y resultado .....	51
Figura 35. Calibración de los planos medios anterior y posterior .....	52
Figura 36. Dimensiones probeta de ensayo de tiro con cañón .....	52
Figura 37. Diseños de sección de pala de helicóptero .....	53
Figura 38. Calibración de la cámara 2 en su plano anterior y factor de conversión (m/px) ...	54
Figura 39. Ejemplo de cálculo de desplazamientos para la probeta C3-01.....	55
Figura 40. Ejemplo del proceso de medida del ángulo girado por la probeta B2-06 .....	57
Figura 41. Tomografía de una bala en el interior de una C16 tras tiro horizontal .....	60
Figura 42. Impactador para el ensayo de caída de peso [Ref.13] .....	61
Figura 43. Dimensiones especímenes Crushing.....	62
Figura 44. Imagen de la torreta de caída libre .....	63
Figura 45. Sección modelo D1 o de referencia.....	64
Figura 46. Colapso del diseño C2-01 (modelo D1) .....	64



# Índice de tablas y gráficos

Tabla 1. Propiedades de la serie XT de Rohacell ®.....	13
Tabla 2. Parámetros introducidos en la máquina multiensayo .....	18
Tabla 3. Resumen de las probetas ensayadas.....	19
Tabla 4. Resumen propiedades medidas en las curvas de respuesta .....	21
Tabla 5. Propiedades seleccionadas para la creación del modelo .....	23
Tabla 6. Evolución del nº de elementos según el tamaño medio de arista.....	28
Tabla 7. Propiedades finales modelo .....	40
Tabla 8. Comparativa entre el modelo conseguido y la curva real del ensayo .....	40
Tabla 9. Relación de propiedades entre modelos .....	42
Tabla 10. Resumen resultados del cálculo de velocidad. Caso tiro horizontal.....	56
Tabla 11. Resumen resultados del cálculo de velocidad. Caso tiro oblicuo .....	57
Tabla 12. Resumen resultados del cálculo energético. Caso horizontal .....	58
Tabla 13. Resumen resultados del cálculo energético. Caso oblicuo .....	59
Gráfico 1. Influencia de la imposición de la condición de contacto .....	38
Gráfico 2. Comparativa de respuesta ante un cambio de velocidad .....	41
Gráfico 3. Comparativa modelos virtuales con la respuesta real .....	43



## Introducción

### 1.1 Contexto

Este proyecto fin de carrera ha sido realizado en el seno del programa de intercambio internacional Erasmus +. El destino elegido para esta tarea ha sido la ciudad francesa de Toulouse, sede principal de una de las empresas más importantes en el campo de la aeronáutica, Airbus Corp. Durante el tiempo vivido en esta ciudad, surgió la oportunidad de realizar una estancia de cinco meses en el Instituto de investigación Clément Ader (ICA) bajo la supervisión de Olivier Dorival, dentro del departamento de mecánica y materiales compuestos que se sitúa en las instalaciones del propio Instituto.

El Sr. Dorival forma parte de un equipo de trabajo para un proyecto conjunto con Airbus Helicopters en la creación de un nuevo modelo de pala de rotor de helicóptero creada solamente a partir de material compuesto (proyecto C.R.O.R., Contrat Rotative Open Rotor). La temática actual de este estudio, es la de impacto sobre estructuras de material compuesto y más concretamente la capacidad de absorción de energía de los diseños ante este tipo de sollicitación dinámica. El equipo de investigación distribuye las áreas de trabajo según las partes que forman los diseños como las pieles (F.Pascal), núcleo de espuma (S.Marguet) o refuerzos (O.Dorival). Existe además una sección de ensamblado y ensayo en la que el Sr. Dorival tiene gran influencia y que será en la que se enmarcará el trabajo presentado en el siguiente documento. En la definición de las diferentes áreas aparecen nombres de excompañeros como responsables de sección, los cuales recibían apoyo de otros trabajadores del centro, así como de alumnos en periodo de prácticas como era el caso propio.

### 1.2 Motivación

**El proyecto C.R.O.R.** se enmarca en el campo de la investigación en torno a nuevos usos de los materiales compuestos. Se tratará por tanto de un proceso lento, por la novedad del mismo y el poco conocimiento que se tiene sobre los mismos. A pesar de ello, se considera un campo en pleno esplendor por su gran capacidad de introducirse en el mundo del transporte y sobre todo, de la aeronáutica.

Airbus Group lleva más de tres años trabajando codo con codo con el Instituto Clément Ader en el avance de este proyecto hasta la consecución de varios diseños prometedores de sección de pala, los cuales se encuentran todavía en fase de estudio. El nuevo hito, se centra en la realización de estudios dinámicos sobre los prototipos ya fabricados previo a su validación.

Se plantea entonces una vía alternativa a la experimental, debido al alto coste de fabricación de cada uno de estos elementos, pasando por la creación de un modelo informático capaz de representar el mismo tipo de ensayos que se realizan sobre los propios prototipos en el laboratorio del centro.

La difícil tarea de conseguir una representación que coincida con la observada en los ensayos realizados sumado a la dificultad que todavía existe alrededor del cálculo de estructuras de material compuesto obliga a la creación de grupos de trabajo separados pero dependientes para el estudio de cada una de las partes que forman las piezas.

La posterior necesidad de cambiar uno de los modelos realizados para representar el comportamiento del núcleo de espuma, dado su alto coste computacional, es la principal razón para el desarrollo del presente documento.

### **1.3 Objetivos**

El presente proyecto fin de carrera se compone de dos objetivos distintos dentro de un marco común, la introducción a la investigación en el campo de los materiales compuestos. Dentro de este marco aparecerán tareas de segundo nivel como una gran formación bibliográfica previa en cuanto a teoría de impacto en estructuras de material compuesto, el aprendizaje de nuevos softwares informáticos de análisis y la adaptación al trabajo de un equipo de investigación.

El primer objetivo se centra en la introducción al mundo de la experimentación dinámica en cuanto a solicitaciones de impacto se refiere. Para ello, se tomará parte en la realización de ensayos de caracterización de propiedades sobre los prototipos de los diseños realizados por este equipo de trabajo para su posterior tratamiento informático con objeto de que la información obtenida sirva para elaborar una comparativa entre los propios modelos. Los objetivos parciales de este primer apartado son:

- Montaje y realización de experimentaciones con registro de datos de las sesiones para los ensayos de Crushing (o colapso de la estructura) y tiro con cañón.
- Post-tratamiento de resultados e imágenes para el ensayo tiro con cañón.
- Análisis energético, resultado de la experimentación, para el ensayo precedente.

El segundo de ellos, se trata de un objetivo más ambicioso y de mayor dificultad. Se pretende cambiar el modelo actual utilizado para representar el comportamiento del núcleo de espuma de los diseños en el software de cálculo de elementos finitos por otro de menor coste computacional basado en elementos 1D. El modelo antiguo se compone de elementos Brick 3D de pequeño tamaño de arista para intentar reproducir el comportamiento de la espuma en el conjunto del diseño de las palas modelizado. Este hecho supone una cantidad enorme de elementos presentes en el modelo que ralentizan el cálculo y no son capaces de representar fielmente ni el comportamiento de la espuma, ni su unión con las pieles exteriores que lo rodean. Los objetivos parciales de esta sección por lo tanto, serán:

- Caracterización de propiedades mecánicas de la espuma real Rohacell® 71XT para su introducción en el modelo.
- Creación de un modelo virtual discreto alternativo al actual y mediante elementos 1D. Introducción de propiedades en el modelo creado con el fin de la reproducción de la respuesta del material ante una sollicitación externa de compresión.

El alcance de este proyecto lo sitúa en el ámbito de la investigación; un mundo rodeado de incertidumbre, ya que se trabaja sobre hipótesis en los estudios con ánimo de que los resultados sean convenientes a lo que se está buscando. El presente trabajo involucra una pequeña parte dentro

de un gran proyecto, simplemente aplicable al avance del mismo, siendo una de las partes de este estudio, la representación de un material específico a un entorno de modelización por elementos finitos y la otra, una experimentación centrada en el análisis de prototipos ya definidos. Por tanto, la información contenida en el siguiente documento, se limita al desarrollo del trabajo que se está llevando a cabo en el Instituto Clément Ader.

## **1.4 Estado del arte. Absorción de energía en estructuras de material compuesto**

El concepto de análisis de absorción energética llevada a cabo por las estructuras de material compuesto es el tema del estudio principal actual del grupo de trabajo perteneciente a esa área de conocimiento en el centro de investigación Clément Ader.

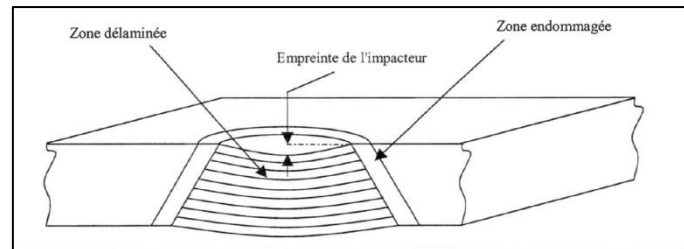
En aeronáutica, las cargas dinámicas a las que pueden estar sometidos los componentes, están protagonizadas por situaciones de impacto tales como fragmentos de motor, trozos de hielo atmosférico o aves. Pero también cabe destacar el daño producido en operaciones en tierra como pueden ser los golpes durante la realización del mantenimiento o en el transporte de piezas. Los ensayos de caracterización de este fenómeno intentan emular situaciones parecidas a las presentadas en este párrafo considerando los impactos en el aire como alta velocidad y baja masa del objeto que produce tal impacto, mientras que las situaciones que involucren objetos con repercusión en operaciones terrestres serán normalmente de tipo baja velocidad y alta masa del cuerpo que impacta sobre la pieza,

Los estudios realizados en el seno del Instituto centran sus expectativas en un diseño capaz de responder de la forma más eficiente posible ante estas situaciones sin llevar a la ruina completa de la estructura.

### **1.4.1 Impacto. Mecanismos de ruina de estructuras de material compuesto**

Los daños producidos alrededor de un fenómeno de impacto se presentan en las estructuras de material compuesto como problemas de aparición bien sea en las fibras o en la propia matriz. Los mecanismos más comunes de aparición para este tipo de estructuras, según la definición realizada por [Ref.1] se rigen por la secuencia: Fisuración matricial, delaminación o rotura de fibras.

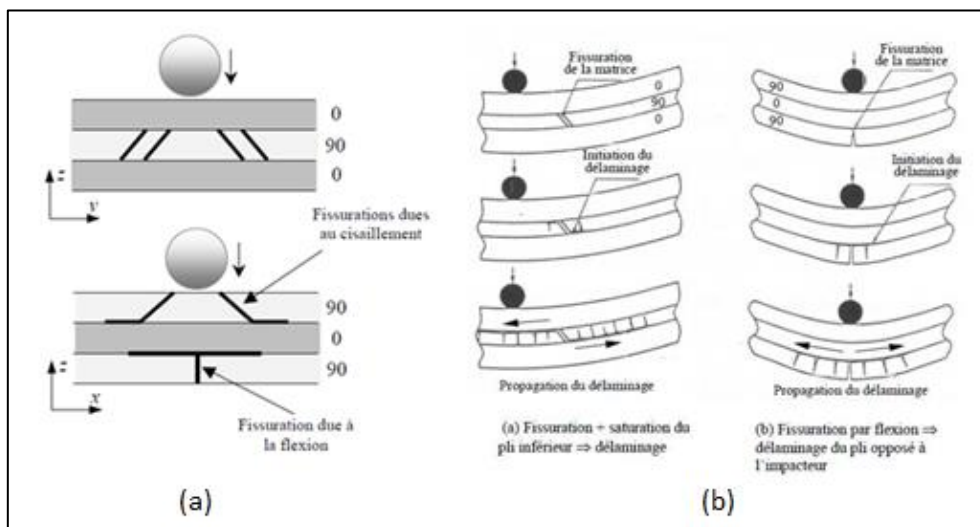
El resultado de la aparición de un fenómeno de impacto sobre una superficie de material compuesto tiene su efecto repartido generalmente por la zona que rodea a ese punto. Se establece que la zona donde pueden aparecer daños tiene forma cónica con centro en ese punto. En el interior de este cono se localiza la parte preferente donde se da lugar al fenómeno de delaminación, mientras que alrededor del mismo se concentrará la zona donde se dan lugar el resto de mecanismos de daño (figura inferior).



**Figura 1. Representación de las zonas de aparición de los mecanismos de ruina**

Los mecanismos que aparecerán predominantemente en este tipo de situaciones serán:

- Fisuración matricial – De naturaleza típica en los impactos a baja velocidad, toma su nombre debido a la aparición de fisuras y decohesiones entre las interfaces fibra matriz. La imagen de una fisuración producida por una sollicitación de cizalladura se presenta con una dirección de 45°, mientras que las debidas a flexión muestran roturas perpendiculares al plano de la placa. (Figura 2, a)
- Delaminage – Corresponde a fisuraciones de las zonas ricas en resina situadas entre dos láminas debido a la existencia de tensiones de cizalladura interlaminar. Este mecanismo tiene como inicio de propagación el mecanismo anterior y comparte direcciones de fisuración con él. (Figura 2, b)
- Rotura de fibras – Fenómeno que aparece de forma más tardía que los ya explicados. Suele localizarse en zonas cercanas al eje del punto de impacto y es debido a enormes concentraciones de tensión. Su aparición suele ser precursora de la ruina de la estructura.



**Figura 2. Mecanismos de rotura y propagación**

Definidos los mecanismos de rotura principales en este tipo de construcciones, se presentarán los parámetros de influencia a tener en cuenta en el análisis de una situación de impacto:

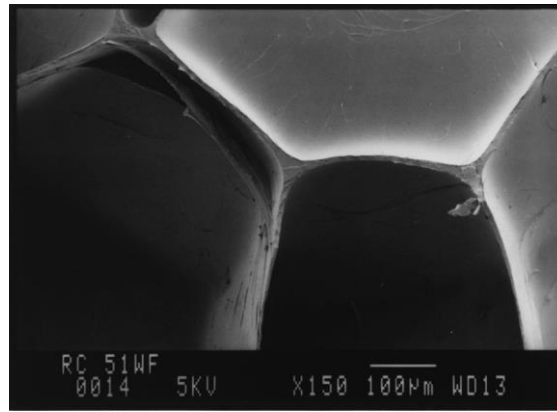
- **La energía de impacto** – Se trata de un parámetro esencial en la comprensión de los fenómenos generados por un impacto sobre una estructura de material compuesto. Determinará la cantidad de energía disponible que podrá ser absorbida por la estructura a través de su deformación elástica y posteriormente mediante la ruina parcial de la misma.
- **Velocidad de impacto** – Según la velocidad de incidencia se definirán impactos de baja velocidad, baja energía donde la respuesta de la placa se considera de flexión global; o de alta velocidad y baja energía con deformaciones más localizadas debido a que dada la alta velocidad no se permite la propagación de las ondas de flexión y de deformación por la placa, quedando estas concentradas.
- **Naturaleza del impactador** – Su forma y rigidez influirán en la capacidad de penetración y el comportamiento tras el impacto respectivamente.
- **Apilamiento de las capas de material compuesto** – La resistencia al impacto tiene gran dependencia de la secuencia de apilamiento de capas en el laminado. Una ley de diseño establece que los cambios de orientación entre capas no deben sobrepasar los 45º de diferencia, para mejorar la resistencia frente a la delaminación, como fenómeno más influyente en este caso.

#### 1.4.2 Trabajos sobre la espuma Rohacell®

La espuma Rohacell® de Evonik Corp. es un producto con más de 40 años de historia y de utilización en soluciones de la industria aeroespacial, automotor, en tecnología médica; así como otros mercados donde se requiere la utilización de construcciones de bajo peso en material compuesto. A pesar de ello, hasta un tiempo reciente, no se había planteado un estudio profundo de sus características mecánicas o frente a sollicitaciones de impacto.

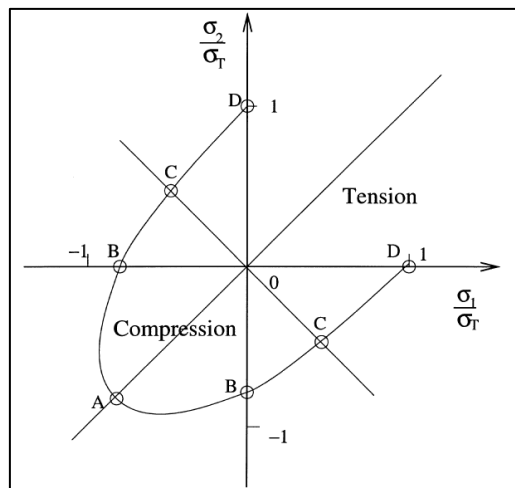
No fue hasta 1999 cuando se publicó *The crush behaviour of Rohacell-51WF structural foam* [Ref.2], un artículo de carácter experimental donde se presentaban las propiedades mecánicas y la estructura de celdas (figura 3) de una de las espumas de la serie WF, de comportamiento parecido a la XT que aparecerá en el siguiente documento.

La espuma Rohacell® se muestra como una estructura de celdas vacías, dado el proceso de fabricación de las espumas por medio de huecos rellenos de aire, que podría asemejar su forma a la de un octaedro o incluso un dodecaedro.



**Figura 3. Detalle microestructura Rohacell 51WF**

Por otro lado, estos mismos autores realizaron la caracterización de propiedades mecánicas de este material con objeto de definir la curva de comportamiento plano, frente a diferentes solicitaciones que aparece en la figura 4. De esta forma, se dio a conocer además la forma característica de la respuesta a cada una de las solicitaciones que definen la curva de comportamiento plano (tracción uniaxial - D, compresión uniaxial - B, cizalladura pura - C, compresión hidrostática - A).

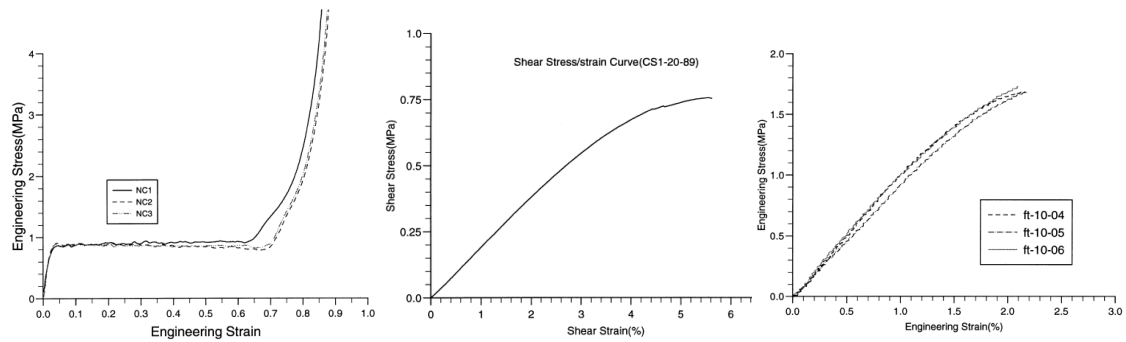


**Figura 4. Definición de curva de comportamiento plano**

El resto de puntos de la curva se calcularon como esfuerzos combinados de las diferentes solicitaciones primarias.

Las curvas de respuesta de los ensayos principales se muestran a continuación, teniendo en cuenta que para el ensayo de compresión se realizaron tres experimentaciones sobre probetas paralelepédicas en las tres direcciones perpendiculares. Se realizaron tres repeticiones también del ensayo de tracción.

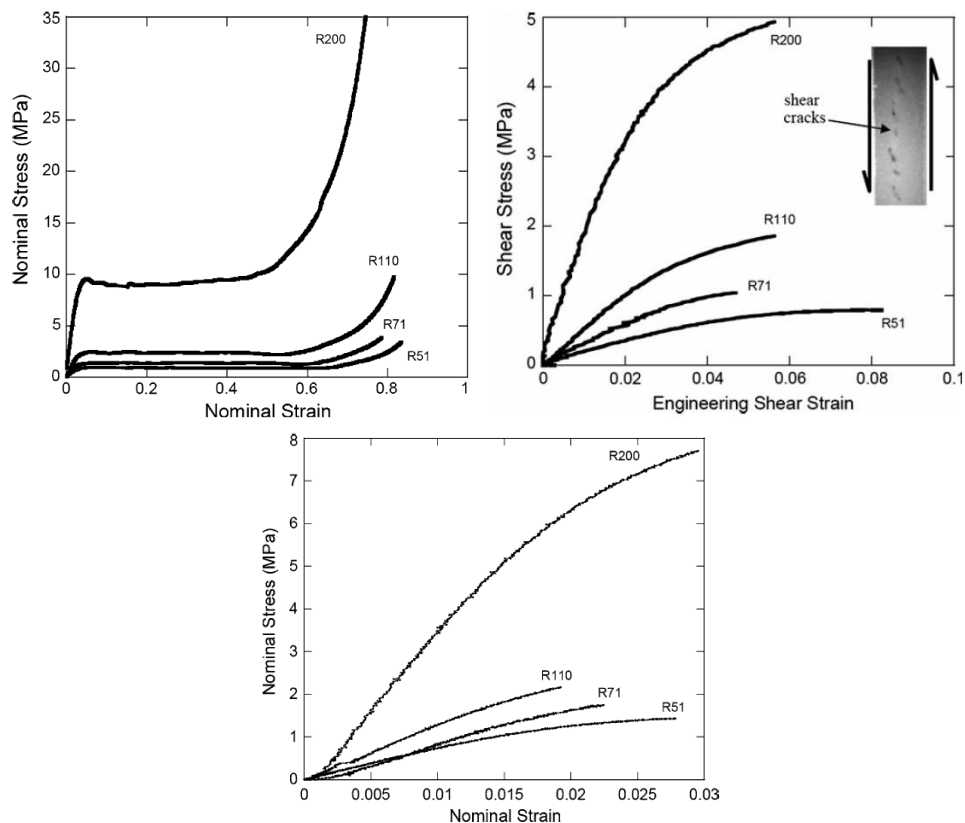




**Figura 5. Curvas de respuesta mecánica R51WF (Compresión, cizalladura y tracción)**

Posterior a este estudio, en el año 2011, *S.Arezzo* [Ref.3] continuó con la investigación de este mismo material realizando de nuevo una caracterización de sus propiedades mecánicas, pero en este caso mediante una comparativa entre los diferentes modelos de la serie WF de Rohacell® y el cambio en la respuesta que se producía tras el ensayo de uno u otro.

La diferencia entre los modelos de la serie estiva en la densidad de cada uno de ellos, se forma que un aumento en la densidad de la espuma se traduce además en una mejora de propiedades mecánicas muy sustancial. En este apartado se presentarán las diferentes curvas de comportamiento para los modelos de la serie.



**Figura 6. Curvas de respuesta mecánica serie R WF (Compresión, cizalladura y tracción)**

Del análisis de las imágenes anteriores se extraerá la forma característica y el tipo de respuesta de cada uno de los ensayos. Se tomará entonces, como la esperada para la realización de las experimentaciones propias. Otra conclusión que se podrá extraer es la posible relación entre curvas para estudios futuros, ya que todas mantienen su forma característica.

### 1.4.3 Trabajos previos sobre el modelado de la espuma.

#### Modelo completo existente

El nuevo hito en el proceso de avance del proyecto C.R.O.R. pasa por la creación de un modelo informático capaz de representar el comportamiento real de los prototipos realizados a partir de los diseños de sección de pala de helicóptero ya desarrollados.

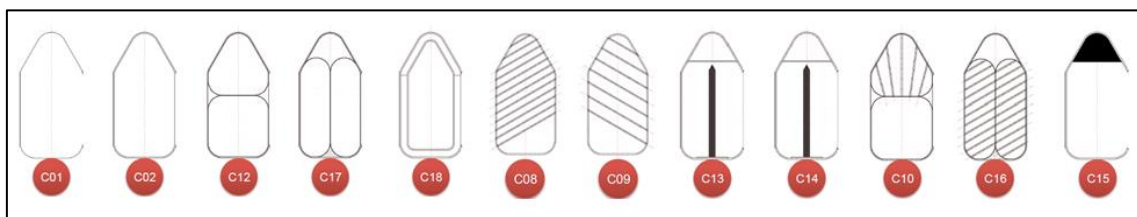
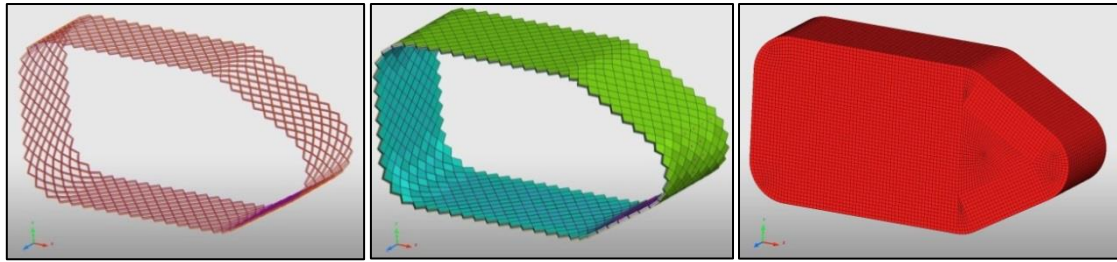


Figura 7. Diseños de sección de pala de rotor de helicóptero

Este trabajo lleva un tiempo efectuándose hasta la consecución de un modelo realizado para el software de cálculo de elementos finitos, Radioss (Altair hyperworks). Este modelo permite representar los diseños más simples (C01 o C02), dado que estos están formados por un núcleo de espuma **Rohacell 71XT** envuelto por capas de tejido de **Aramida 12K** orientada a  $\pm 45^\circ$  sobre una matriz inyectada de resina **HexFlow RTM6**. El modelo que se creó a partir de estos diseños se compone de tres partes, cada una creada a partir de un tipo de elemento distinto:

- Las fibras de tejido de Aramida se modelan mediante elementos barra 1D orientados a  $\pm 45^\circ$  como en el tejido real.
- La resina, como elemento de unión de fibras y de rigidizador de la estructura, se modela mediante elementos placa 2D entre las fibras.
- Por último, el núcleo de espuma estará formado por elementos brick 3D de pequeño tamaño en busca de la correcta representación de una gran sección de este material.

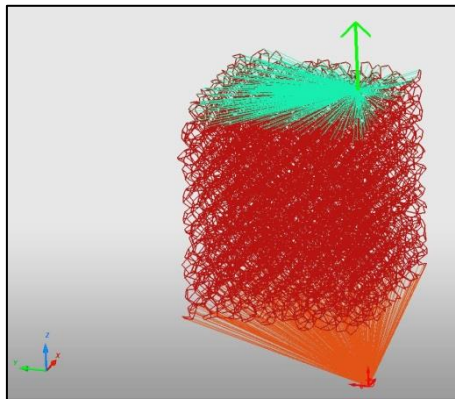
Las imágenes siguientes ilustran la modelización de estas tres partes en una probeta virtual realizada para el ensayo de Crushing (Apartado 5.2). El pequeño tamaño de los elementos 3D que forman la espuma virtual, además de la dificultad que supone simular la unión entre cada una de las partes, hacen que este modelo tenga un coste de cálculo muy alto, de ahí el planteamiento de sustituir el modelo de la espuma.



**Figura 8. Modelización de los elementos que forman la pala**

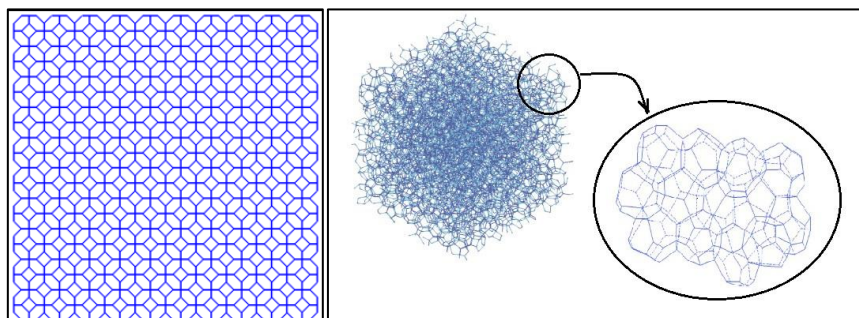
### **Presentación de nuevos modelos**

El nuevo modelo estará basado en la realización de una estructura a partir de elementos 1D que pueda asemejar, tanto a la microestructura real de la espuma Rohacell®, como a su comportamiento. Trabajos anteriores de compañeros (F. Pascal, P. López y J. Aubry) de este instituto plantearon la reproducción de esta estructura a partir de elementos octaédricos en diferentes densidades de mallado para el posterior análisis de su respuesta mecánica [Ref.4 y 5].



**Figura 9. Estructura de octaedros virtual para identificación de propiedades mecánicas**

Para la consecución de este modelo se ayudaron del código creado por S. Marguet, que conseguiría la creación de una estructura de malla constituida por elementos 1D colocadas formando estructuras octaédricas perfectas. En un paso posterior, se les aplicaría la segunda parte del código, que procedía a la perturbación de estos elementos en dirección y longitud de barras mediante un proceso estadístico aleatorio, manteniendo la conexión estructural. El modelo resultante (figura 10), tenía celdas de diferentes tamaños y de forma irregular, una aproximación mucho más realista de la forma real de esta estructura.



**Figura 10. Estructura regular inicial y mallage perturbado a partir del antiguo código**

El modelo anterior presentaba buenas expectativas, tal y como se mostraba en el artículo *Change of Scale Strategy for the Microstructural Modelling of Polymeric Rohacell Foams* [Ref.6] en cuanto a respuesta a los ensayos de tracción y compresión analizados, pero no conseguía reproducir las características del de cizalladura. Es por ello que se plantea un nuevo modelo de creación de este mallage discreto para la microestructura de la espuma Rohacell®.

#### 1.4.5 Entorno informático

Para llevar a cabo el trabajo de modelización de este material, se requerirá de un programa de diseño y cálculo por elementos finitos. Por tradición con la empresa a la que pertenece este proyecto (Eurocopter, de Airbus Group), el software de cálculo elegido para llevar a cabo esta tarea será el Radioss, del grupo Altair Engineering Inc.



La empresa Altair comercializa un paquete de software de diseño y cálculo de elementos finitos donde cada uno de los programas se especializa en un cometido. El interés de este estudio se centrará en los paquetes de diseño de situaciones de impacto mediante el programa HyperCrash, las variaciones del diseño de piezas y mallado de las mismas mediante Hypermesh; la visualización de gráficos de respuesta y vídeos y por último el solver (o programa de cálculo) Radioss, encargado de lanzar y resolver las simulaciones preparadas a través de los dos programas anteriores.

## **1.5 Organización de la memoria**

La presente memoria se dividirá en seis apartados de estudio de los cuales los apartados 2, 3 y 4 guardan una estrecha relación por pertenecer a la parte del estudio desarrollada alrededor del trabajo de modelización del material de la empresa Rohacell®.

El presente apartado, ya finalizado, se encargará de la introducción de este estudio, presentando las razones de su existencia y la información previa de interés para sentar las bases del mismo.

El segundo capítulo presenta el material que se pretende modelizar y se realizará la caracterización de sus propiedades mecánicas a partir del ensayo del mismo en las instalaciones del instituto. El tercer capítulo profundiza en la fase de modelización informática de piezas hechas de este material de forma que presenten un comportamiento análogo al del material real. En este mismo capítulo se analizan comparativamente los resultados obtenidos a través del modelo con los que provienen de la caracterización del material real. En el cuarto capítulo se darán cita dos perspectivas de realización posible a corto plazo para complementar este modelo.

El capítulo cinco, contiene la información referente al periodo de experimentación en ensayos dinámicos de impacto realizado durante la estancia en el instituto. El ensayo de tiro con cañón fue el más recurrente durante ese tiempo y sobre el que más trabajo se pudo realizar.

Por último, el sexto apartado presentará las conclusiones generales de este trabajo, la evaluación de los objetivos cumplidos, etc.; así como una opinión personal de la etapa de paso por el Intituto Clément Ader.

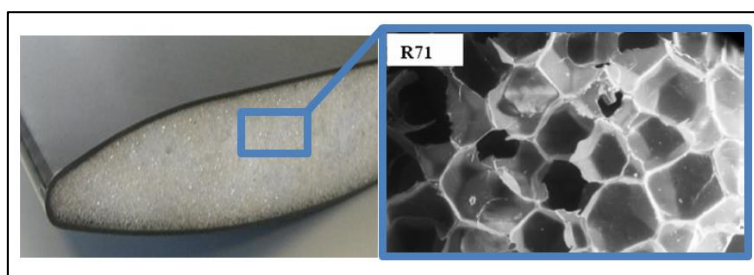
# Caracterización del comportamiento de la espuma Rohacell ®

La sección actual tiene como objetivo la realización de ensayos de caracterización sobre la espuma Rohacell 71XT ante una sollicitación externa de compresión. Para ello se realizará una presentación del material y sus propiedades mecánicas, según lo estipulado por el fabricante; se caracterizará la forma de respuesta esperada previamente a los ensayos y finalmente se llevará a cabo la experimentación final sobre una serie de probetas cilíndricas de este material que habrán sido fabricadas por el propio equipo que efectúa este estudio.

## 2.1 Presentación del material

La espuma Rohacell 71XT, protagonista en este estudio, es un producto desarrollado por la empresa Evonik Industries. Parte de esta compañía alemana es Rohm & Hass Company producción, que utiliza Rohacell ® como nombre comercial en el mercado y principal suministrador actual de espuma polimetacrilimida (polimetacrilimida, PMI). La espuma Rohacell de Evonik es un producto con más de 40 años de utilización en soluciones para industrias aeroespaciales, automotor, tecnología médica; así como otros mercados donde se requiere la utilización de construcciones de bajo peso en material compuesto.

Se trata de una material plástico, formado por una microestructura de celdas alveolares cerradas homogéneas y con propiedades isotrópicas. El tamaño medio de estos alveolos es de unos 0.5mm.



**Figura 11. Detalle estructural de la espuma Rohacell 71XT**

Las características de este tipo de espumas basadas en polimetacrilimida son:

- Altas propiedades mecánicas respecto a otras espumas como la de OU o PVC.
- Excelente resistencia química.
- Compatibilidad con otras resinas, muy importante para fabricación de estructuras de material compuesto.

- Facilidad para mecanizado o termoformado.
- Resistencia al fuego.

El serie XT de Rohacell ® se utiliza como material principal en piezas BMI-Sandwich usadas en aviación y construcción; ya que permite procesos de termoformado y curado a temperaturas y presiones mayores a 180° y 0.45 MPa, lo que posibilita su introducción en autoclaves para acompañar en la conformación del material compuesto.

### 2.1.1 Características mecánicas. Rohacell® 71XT

Dentro de la serie XT de Rohacell ®, el fabricante ofrece dos variantes de la misma, cuyas propiedades se resumen en la tabla 1. La diferencia entre ambos modelos estriba en las propiedades mecánicas de cada una, superiores en la 110XT pero el interés de este estudio se centrará en la 71XT, dada la alta presencia de la misma en los diseños llevados a cabo por el equipo del proyecto C.R.O.R. (figura 7).

Además de las distintas características mecánicas presentadas en la tabla, el fabricante indica la normativa de ensayo seguida (tanto europea como americana) para la obtención de cada una de las propiedades. Este tipo de información será de gran utilidad para la realización, a posteriori, de ensayos de caracterización propios para comparación con los cedidos por el fabricante.

Tabla 1. Propiedades de la serie XT de Rohacell ®

Properties of ROHACELL® XT				
Properties	Unit	ROHACELL® 71XT	ROHACELL®110XT	Norma
Density	kg/m <sup>3</sup>	75	110	ISO 845
	lbs./cu.ft.	4.68	6.87	ASTM D1622
Compressive strength	MPa	1.7	3.6	ISO 844
	psi	246	522	ASTM D1621
Tensile strength	MPa	2.2	3.7	ISO 527-2
	psi	319	536	ASTM D638
Shear strength	MPa	1.4	2.1	DIN 53294
	psi	203	304	ASTM C273
Elastic modulus	MPa	105	180	ISO 527-2
	psi	15,225	26,100	ASTM D638
Shear modulus	MPa	42	63	DIN 53294
	psi	6,090	9,135	ASTM C273
Strain at break	%	4	4	ISO 527-2 ASTM D638

Información obtenida de la web del fabricante:

- <http://corporate.evonik.com/en/Pages/default.aspx>
- <http://www.rohacell.com/product/rohacell/en/about/pages/default.aspx>

### 2.1.2 Comportamiento de la espuma

La importancia del estudio de experimentación sobre la espuma de baja densidad Rohacell® radica en entender el comportamiento, y por tanto la respuesta mecánica, de la misma ante la aplicación de diferentes solicitaciones mecánicas típicas, de forma que puedan implantarse posteriormente en un modelo informático para su representación. En el apartado 1.4 de esta memoria, se introdujo la forma característica de la respuesta de este material frente a diferentes situaciones, pero a partir de este punto, el trabajo se centrará en forma de la respuesta de este tipo de material plástico de celdas cerradas ante un esfuerzo de tracción uniaxial o compresión. La solicitación de cizalladura se deja para futuros estudios que continúen a partir del presente trabajo.

En referencia a la respuesta de la espuma ante una solicitación de tracción, se caracteriza como un proceso de rotura frágil con una pendiente aproximadamente constante. Esta parte de la curva se corresponde con el módulo de Young del material y con la pendiente de la zona lineal de la respuesta ante un esfuerzo de compresión.

Por su parte, en la respuesta ante una solicitación externa de compresión presenta la siguiente evolución:

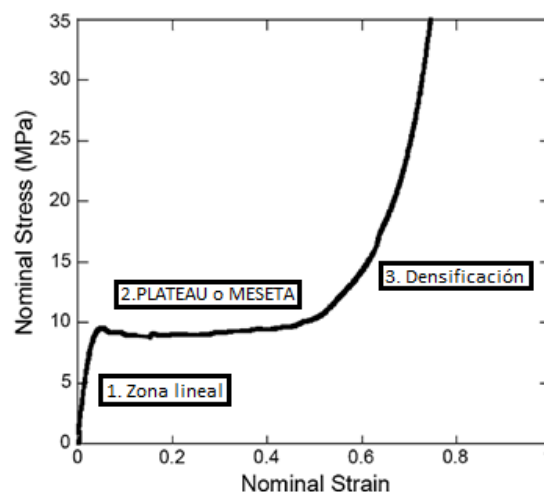


Figura 12. Partes de la curva de respuesta en compresión

De la imagen superior se distinguirán tres zonas de evolución de la respuesta.

- La primera de ellas (1) corresponderá a la zona lineal de la misma, referente a la parte de deformación elástica lineal. La pendiente de (1) es la misma que la del ensayo de tracción, de forma que existe correspondencia entre la zona lineal de ambos ensayos.
- La parte central (2) o PLATEAU (meseta), se muestra como una evolución plana de la respuesta, consecuencia de la microestructura de este material, el cual está formado por celdas vacías (figura 11). Una vez se ha superado en el proceso de deformación la parte elástica, la discontinuidad del material permite facilitar la continuación del mismo de forma que el esfuerzo se mantiene constante mientras la deformación avanza.



- La última de las partes (3) o zona de DENSIFICACIÓN se corresponde con el comienzo de la desaparición del espacio interior de las celdas vacías. Es decir, aparece un contacto entre paredes de estas celdas de forma que el material comienza a deformarse como un sólido continuo, aumentando así de manera exponencial el esfuerzo necesario para avanzar en el proceso de la compresión del mismo.

## 2.2 Ensayado de la espuma

La realización del ensayo de compresión uniaxial se llevará a cabo en las propias instalaciones del instituto, de forma que se tendrá acceso directo a las propiedades finales de la espuma y se pondrán comparar éstas con las dotadas por el fabricante.

El interés de este apartado radica en dos vertientes. La primera es la de poder ensayar exactamente la misma espuma que se utilizó para la creación de los prototipos, ya que se facilitó una muestra de la misma por parte de la empresa Airbus Co (figura 13); introduciendo así en modelo informático las mismas características que las que deberán tener los prototipos y pudiendo establecer una comparación más estricta.

Por otro lado, el ensayado de esta espuma, implica que se está trabajando sobre un material que lleva tiempo almacenado en condiciones normales pero sin protección especial, dado que la muestra es anterior a la realización de los ensayos. Este hecho posibilitará un análisis bien del deterioro del material o bien la correspondencia con los datos suministrados por Rohacell ®.



Figura 13. Bloque de espuma R71XT para experimentación

A continuación se matizará la normativa seguida para la correcta consecución de este tipo de ensayos, así como la preparación llevada a cabo en la sala y la realización del propio ensayo de compresión.

### 2.2.1 Normativa de ensayo

En materia de normativa de ensayo, se decidió seguir la tendencia llevada por el fabricante; es decir, aplicar la normativa vigente para la selección del tipo de probetas a realizar, la velocidad, el tipo de ensayo... De esta forma, volviendo a la tabla 1 se observa que existen dos normativas referentes a cada tipo de ensayo, la americana y la europea. Nuestro interés se centrará únicamente en el ensayo de compresión uniaxial, por tanto en las normativas tanto ISO 844 como ASTM D1621. Se tomará como referencia la ISO 844, dada la localización actual del estudio.

Respecto a la preparación de probetas de ensayo, la normativa establece que los especímenes de estudio deben tener **un espesor mayor a 10 mm, con base circular o cuadrada con un área comprendida entre 25 y 230 cm<sup>2</sup>**. Se establece además una condición de tolerancia de paralelismo de las caras en un 1% sobre la distancia entre las dos caras de contacto con la máquina de ensayo.

Por otro lado, respecto a la forma de proceder, se trabajará sobre una máquina de ensayo para compresión bajo las condiciones de velocidad de deformación lo más cercanas posible al 10% del espesor de las piezas (en mm/min) hasta una que se produzca una **reducción de este espesor en un 85%** respecto de la dimensión original. Para la determinación de propiedades mecánicas, se requiere el registro de la fuerza realizada por la máquina durante el proceso, así como uno del desplazamiento de la misma.

### 2.2.2 Preparación de las probetas

El instituto Clément Ader cuenta con amplias instalaciones de ensayo, pero por el contrario, está limitado en tareas de fabricación. Se requerirá entonces de las instalaciones de una universidad local para realizar las tareas de preparación de las probetas. El Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas (INSA) de Toulouse, de amplia tradición aeronáutica, cuenta con un taller especializado en ingeniería mecánica donde serán realizadas las labores de conformado. Tras este trabajo, será de nuevo en el Instituto, donde se realizarán los ensayos de caracterización sobre las probetas creadas.

Para la realización de estos especímenes, se dispone del bloque de muestra de espuma Rohacell 71XT que coincide con la utilizada en la fabricación de los prototipos, los cuales se diseñaron a partir de la utilización de esta espuma. Se cuenta inicialmente con una muestra rectangular de espuma de 200 x 100 mm y con un espesor de 40 mm sobre la que se decidió actuar realizando probetas de ensayo cilíndricas por su sencillez tanto de ensayo como de fabricación. El criterio seguido en la selección del tamaño de éstas debe satisfacer:

- Primero, dada la gran importancia de la placa de muestra de espuma (por ser ésta única), deberá optimizarse el número de piezas cortadas para desperdiciar la menor cantidad de material posible y poder disponer de este para posteriores ensayos a realizar.
- Segundo, por el contrario, este criterio práctico debe respetar la característica de repetibilidad de ensayos. La aleatoriedad en la distribución estructural de los materiales heterogéneos hace entrever una posible variabilidad de resultados a la hora de realizar este tipo de ensayos.

Entendiendo como repetibilidad el “grado de acuerdo entre resultados mutuamente independientes de un ensayo, obtenidos utilizando el mismo método, en idénticos materiales, mismo laboratorio, por el mismo operador usando el mismo equipo y en un intervalo de tiempo corto”.

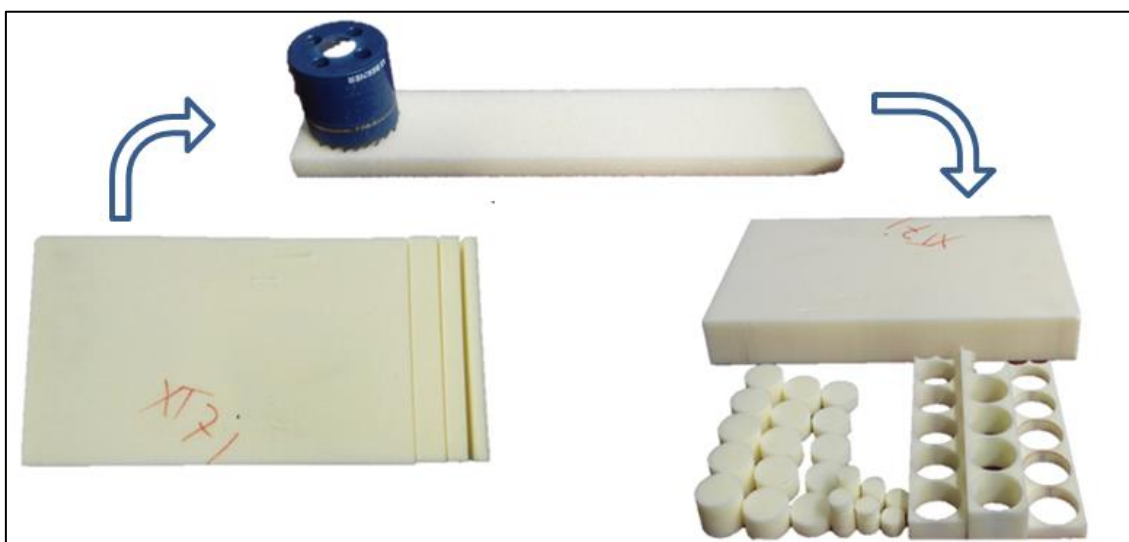
Se decidió elaborar un número grande de probetas a ensayar para conseguir un espectro de referencia amplio capaz de ser representativo del comportamiento del material

completo. El número de pruebas necesario tiene que ser tal que se pueda observar la dispersión que se produce entre las diferentes pruebas para luego tener en cuenta en el momento de proceder con el análisis de resultados. Las **variables seleccionadas** para la representación de este efecto serán el **diámetro y el espesor de las muestras**.

Por su parte, en pro de un aprovechamiento máximo del material, se procederá de la siguiente manera:

Mediante una sierra circular de desplazamiento vertical, se realizarán 3 listones de la misma sección (**100 x 40 mm**) pero de diferente espesor (**12mm, 22mm y 32mm**), dada la condición de repetibilidad que buscamos (figura 14).

El siguiente paso en el proceso de fabricación pasa por realizar el taladrado de las probetas cilíndricas en los listones creados anteriormente. Para este efecto se utilizará una taladradora de columna presente en las instalaciones del departamento de ingeniería mecánica de la universidad por medio de la utilización de brocas de vaso huecas. Se seleccionarán unos diámetros de probeta de **38mm** y **20mm** para la optimización del mayor número posible de cilindros conseguidos. El resultado, es la obtención de 15 especímenes correspondientes a un diámetro 38mm y 6 de un diámetro 20mm.



**Figura 14. Proceso de creación de probetas cilíndricas**

Las acciones posteriores a efectuar serán la realización de tareas de acabado sobre las probetas para eliminar los desperfectos producidos durante los trabajos de mecanizado, la comprobación de las dimensiones de las probetas mecanizadas y el registro de estas mediante indicadores para poder realizar el seguimiento de las mismas durante los ensayos. La **tabla 1 del anexo A.1**, recoge el resultado de estas mediciones.

Trabajos realizados anteriormente por el equipo del Instituto, revelaron la ventaja de incluir en las probetas una marca con forma triangular, de forma que se posibilite la medición de la deformación del proceso a través de la evolución de esta marca (**apartado A.1 anexo**).

### 2.2.3 Preparación del equipo de ensayo

La experimentación se realizará a través de una máquina multi-ensayo del fabricante Instron (figura 15). Para la preparación de esta máquina, se retirarán las pinzas utilizadas en ensayos de tracción previos a este estudio, se colocará una base sólida en la parte inferior de la máquina y un impactador cilíndrico en la superior, el cual se encargará de realizar la compresión del espécimen de estudio. El detalle de este montaje se puede observar en la figura 16, frente a la cámara digital dispuesta.

La máquina dispone de un panel de control de parámetros donde se fijará, tanto la velocidad de ensayo, como ciertos parámetros de seguridad y sus valores se recogen en la tabla siguiente:

Tabla 2. Parámetros introducidos en la máquina multiensayo

Velocidad de deformación (mm/min)	6
Fuerza máxima (N)	6000
Desplazamiento máximo	Corresponde con el punto en el que el impactador haría contacto con la base inferior.

El interés de este tipo de ensayos se sitúa en la obtención de la respuesta del material ante un ensayo de compresión, por lo que deberá realizarse el registro de esta curva. Para ello, se utilizará un osciloscopio Yokohama DL708E, directamente conectado a la máquina de ensayo dado que esta ya incorpora un captor de fuerza en el brazo superior que suministra los datos en valores de tensión (V), así como un control del desplazamiento del mismo.

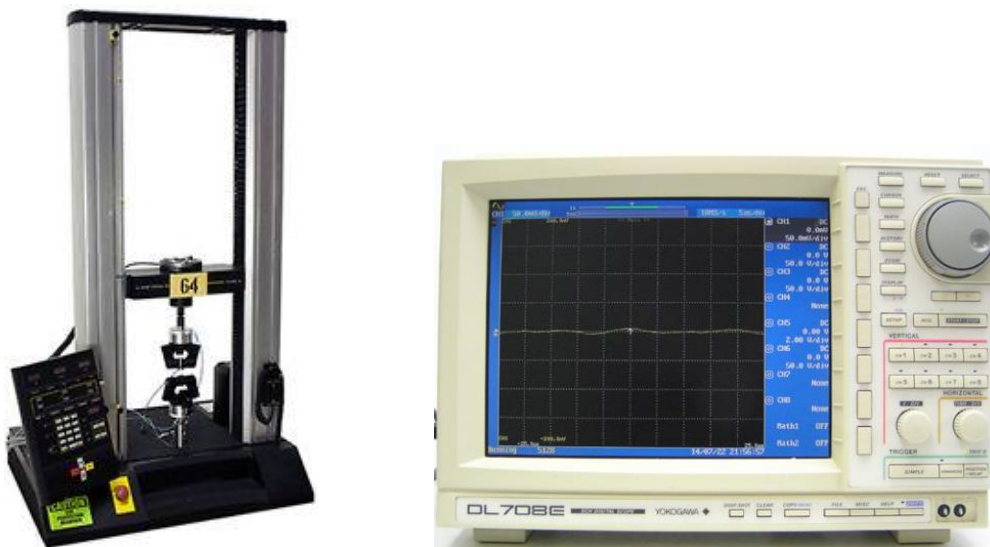


Figura 15. Máquina multiensayo Instron y osciloscopio Yokohama DL708E

Los parámetros de visualización impuestos en el osciloscopio se impusieron de forma que se pudiera observar la evolución completa de la curva del ensayo. Teniendo en cuenta que el captor de fuerza tiene una **ratio de transformación de 1V/KN** y que se esperan alcanzar unos valores máximos de entre 4 y 5 KN, los valores de escala para los ejes serán:

División tensión (V/div)	1
División tiempo (s/div)	50

Para la obtención de las curvas, se deberán graficar los valores de fuerza registrados por medio de un factor de conversión para el paso los valores de tensión a valores de fuerza (N/V) y con un paso temporal constante para cada valor registrado igual a la **frecuencia de disparo** impuesta en el **osciloscopio (HResolution)** y que se corresponde a **0.05 segundos**.

Como complemento al ensayo, para su uso en posteriores análisis, se realizará también un registro por imágenes del proceso. Para ello, se colocará una cámara digital frente a las probetas y la máquina de ensayo que, mediante un software de control, ajustará la realización una foto cada dos segundos del proceso; de forma que se pueda identificar cada imagen con el instante temporal en el que se ha realizado.



Figura 16.Colocación de la cámara para el registro por imágenes

Como marca la normativa vigente en materia de este tipo de ensayos (ISO 844 – [Ref.7]), se procederá a la realización del ensayo hasta que se haya alcanzado la deformación correspondiente al 80% de la longitud de la probeta, momento en el que se detendrá este.

Dada la lentitud de los ensayos a pesar de la velocidad de deformación de 6mm/min, superior a la de la norma pero con resultados muy similares, solo se permitió la realización de los ensayos sobre la mitad de los especímenes, quedando el resto a la espera de una nueva posible tanda de ensayo.

Tabla 3. Resumen de las probetas ensayadas

Referencia					
H32D38-1	H22D38-1	H12D38-1	H32D20-1	H22D20-1	H12D20-1
H32D38-2	H22D38-2	H12D38-2			
H32D38-3					

### 2.2.4 Resultados del ensayo

Tras la tarea de realización de todas las experimentaciones, se descargaron los datos registrados mediante las diferentes vías que se impusieron (imágenes, datos...). Algunas de las secuencias de imágenes registradas a través de la cámara fotográfica, se muestran resumidas en el **apartado A.3 del anexo**.

Los datos obtenidos a través del osciloscopio se presentan como archivos de texto que serán incluidos en una hoja de cálculo donde poder graficar las curvas de respuesta obtenidas en valores de tensión frente a deformación a través de los factores de conversión que se han presentado anteriormente.

La forma de las curvas resultantes queda reflejada en la figura 17 en la que además aparecen imágenes captadas por la cámara de la evolución de la deformación de la probeta. Los hitos seleccionados en la curva para la identificación de las imágenes son aproximados al punto donde se sucede dado que estas guardan una relación constante al instante temporal en el que fueron captadas.

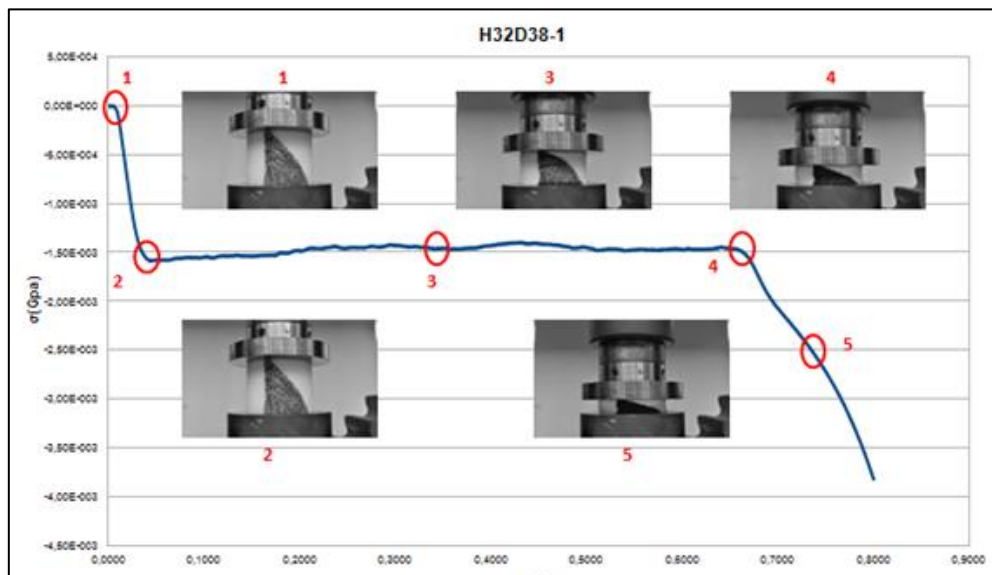


Figura 17. Evolución del ensayo de compresión y curva de respuesta. REF: H32D38-1

Dado que el interés de este apartado pasa por crear una comparativa tanto entre diferentes dimensiones de las probetas de ensayo como de conseguir un modelo informático fiel de esta respuesta, se definirán ciertos valores representativos que permitan realizar una comparación de forma sencilla de los casos citados. Debido a que la curva de comportamiento tiene tres zonas definidas en su evolución (apartado 2.1.2), se ha decidido obtener un valor representativo de cada una de esas zonas, siendo estos:

- **Módulo de Young del material** – correspondiente con la pendiente de la zona lineal de la curva y que coincide tanto en tracción como compresión.
- **Tensión media de la meseta** – parte central de la curva, de apariencia plana y por tanto se tomará un valor medio de los valores de la misma.

- **Inicio de la densificación** – la importancia de esta parte de la curva reside en el punto de inicio de la densificación por encima de la pendiente de la misma, ya que lo que muestra es un aumento exponencial de la fuerza requerida para continuar con la deformación.

Los ejemplos de cálculo de valores para la realización del gráfico tensión deformación, los ejemplos del proceso de ensayo y las curvas comparativas de los resultados, quedan recogidos en el **apartado I.I del anexo** de este escrito.

## 2.2.5 Conclusiones

El siguiente apartado presentará las conclusiones respecto a los resultados obtenidos tras la comparación de las diferentes respuestas ante el ensayo de caracterización del material.

La tabla 4 muestra un resumen de las propiedades mecánicas que se desprenden de la observación de las curvas.

**Tabla 4. Resumen propiedades medidas en las curvas de respuesta**

Referencia	Módulo Young (Mpa)	Tensión meseta (Mpa - media)	Inicio densificación (deformación)
H32D38-1	65,00089451	-1480	0,65
H32D38-2	58,30337079	-1500	0,65
H32D38-3	63,2	-1470	0,65
H22D38-1	55,31791908	-1510	0,62
H22D38-2	60,25862069	-1520	0,63
H12D38-1	35,17175573	-1500	0,66
H12D38-2	39,50819672	-1490	0,67
H32D20-1	75,3030303	-1520	0,65
H22D20-1	56,1627907	-1560	0,62
H12D20-1	38,55851064	-1540	0,64

Centrando el análisis por partes, se deben separar las conclusiones de este apartado en dos vertientes. La primera de ellas hace referencia a las condiciones de repetibilidad impuestas en los ensayos. La segunda, tendrá consideración sobre el material completo y la dispersión de los valores. La toma de valores de las curvas se realizó directamente sobre las curvas, lo que podría afectar al valor obtenido añadiendo otro factor de dispersión no contemplado.

Se observa una baja dispersión de valores en la comparativa entre ensayos realizados sobre probetas de referencias coincidentes, lo cual es positivo para paliar el hecho de no haber podido llevar a cabo todas las experimentaciones sobre las probetas cortadas. En cuanto a las variables de estudio, puede verse que existe una diferencia reseñable tanto en la parte de la zona lineal como en el inicio de la densificación en todos los casos, por el contrario el valor de la ordenada de la zona plana de la respuesta está muy próximo en todos los resultados.

En el análisis conjunto de los resultados y a pesar de las diferencias entre las respuestas de las probetas de diferente dimensión, se observa una tendencia a mantener la curva característica de este tipo de materiales ante un esfuerzo de compresión, lo cual se valoró positivamente por parte del equipo. Se podría encontrar una explicación a la gran dispersión mostrada sobre las probetas de pequeña dimensión de la altura. Como ya se explicó en la sección de elección de las dimensiones de las probetas, el tamaño de los aveolos de la espuma tendrá gran repercusión a la hora de elegir estas dimensiones, dado que cuanto más se aproxime el valor de las dimensiones de la probeta al del tamaño del alveolo (1mm), mayor sería la dispersión de los valores. El hecho de que la carga aplicada sea en la misma dirección que la dimensión de la altura, evidencia esta variable como crítica en la selección de valores para realizar este tipo de estudios. El diámetro en cambio no muestra tanta dispersión en ese sentido, manteniendo un margen mucho menor en cuanto a la comparación de probetas de misma altura y diferente diámetro de fabricación.

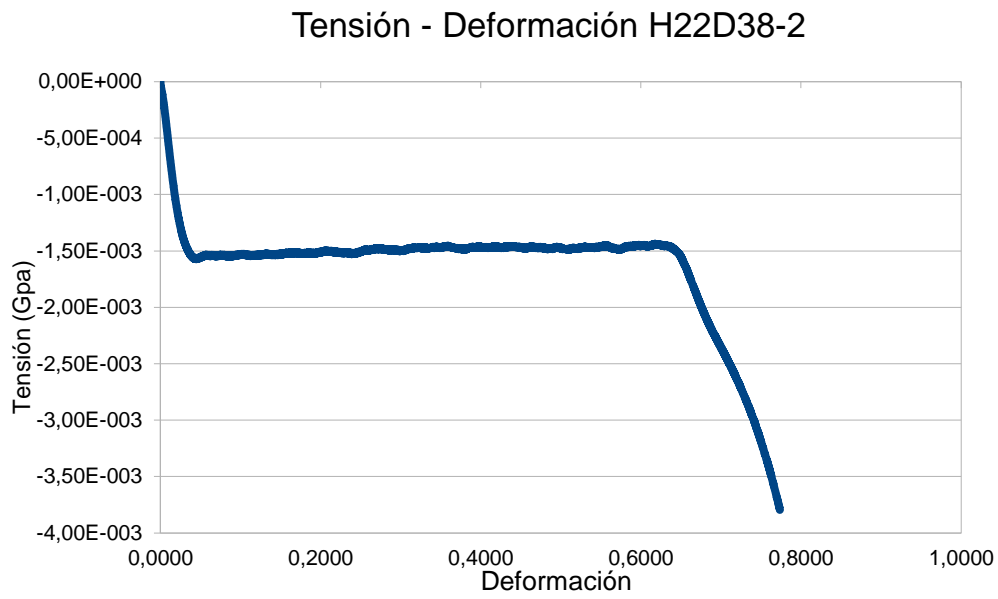
Desgraciadamente el mayor problema deducido de este análisis surge de la comparación de estos valores con los establecidos por el fabricante:

Properties	Unit	ROHACELL® 71XT
Compressive strength	MPa	1.7
Elastic modulus	MPa	105

Mientras que el valor de la zona plana (compressive Strength) podría ser cercano a los obtenidos, el valor del módulo elástico queda muy alejado de los que se han obtenido. Las razones que se pueden intuir en este sentido pueden atribuirse a la antigüedad del material, las condiciones de almacenamiento o a la falta de información por parte del fabricante en cuanto a la referencia de los valores expuestos. No se pudo atribuir finalmente ninguna de las causas, ya que se prefirió tomar los valores obtenidos como representativos, debido a que los prototipos realizados a partir de los diseños C.R.O.R., comparten procedencia con el bloque de espuma del que se dispone. Se considerará por tanto, como información más representativa, la obtenida a través de estos ensayos.

Se tomará como valores medios para el apartado de modelización los conseguidos para la probeta H22D38-2 y que se recogen en la siguiente tabla:





**Tabla 5. Propiedades seleccionadas para la creación del modelo**

Propiedades medidas		H22D38-2
Módulo Young	60,2586207	Mpa
Tensión media meseta	-1520	Mpa
Inicio densificación	0,63	

Tabla...

## Modelización del comportamiento de la Rohacell® 71XT

El objeto del estudio realizado en esta sección es el de tratar de reproducir el comportamiento de la espuma de polimetacrilimida Rohacell 71XT mediante un modelo informático ante un esfuerzo puramente de compresión. Este fin puntualizado, proviene de una tarea mucho mayor, que es la de realizar los ensayos dinámicos sobre las probetas del proyecto C.R.O.R. de forma virtual. Se trata de una tarea enorme, por lo que gran parte del equipo que forma el área de materiales compuestos del ICA se repartirá el peso de la investigación sobre este proyecto, dividiéndose según las partes de las que están formadas cada uno de los diseños (espuma, pieles de material compuesto y refuerzos). Dada la amplia diversidad de trabajos a abordar, inicialmente este estudio debería centrarse únicamente en el análisis del comportamiento de la espuma. Preferentemente se trabajará sobre la realización de los ensayos de caracterización estática sobre el material real, que servirán de apoyo en posteriores estudios dinámicos o de impacto sobre esas mismas partes tanto individual como colectivamente analizadas.

Finalmente, el tiempo limitado que pudo dedicarse a la realización de este estudio desembocó en la única posibilidad de realizar ensayos de caracterización ante un esfuerzo compresivo, mientras que el resto de situaciones se plantearían como líneas de trabajo futuras a partir de este estudio. De esta condición se desprende que el único modelo que podría validarse sería uno que represente ese tipo de ensayo y será por tanto el modelo que va a realizarse.

### 3.1 Antecedentes en torno a la modelización de este material

La espuma de polimetacrilimida del fabricante Evonik Corp. (Rohacell ®), concretamente su modelo 71XT está presente en muchos de los diseños de sección de palas de helicóptero realizados en este Instituto. Antiguos trabajos, como los que se presentaron en el apartado 1.4 y a los que se añaden otros de compañeros de este mismo centro que iniciaron una investigación en torno a la modelización de este tipo de espuma [Ref.5, 6 y 8]; se utilizarán en la toma de contacto con este tipo de procedimiento.

Los estudios realizados en las referencias presentadas establecían modelos de espuma a través de; bien elementos Brick 3D, como en el caso del estudio realizado por P.Navarro y el antiguo diseño del núcleo de espuma para el modelo del ensayo de crushing; bien elementos barra 1D mediante la antigua formulación del código desarrollado por S.Marguet en [Ref.6]. Las dos configuraciones referenciadas no fueron capaces de satisfacer las necesidades de este tipo de modelo computacional, ya fuere por capacidad de representación de la respuesta o por el tiempo empleado para ello.

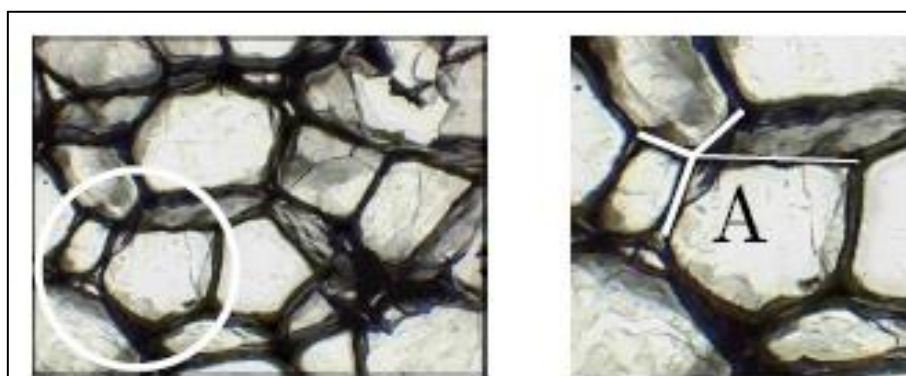
El nuevo modelo que se planteará, será desarrollado a partir de un nuevo código que sustituirá al utilizado anteriormente en la creación de la estructura de elementos 1D que intente emular a la microestructura real de la espuma.

Se establece por tanto, que el nuevo modelo deberá ser capaz de representar el comportamiento de la espuma ante una sollicitación externa de compresión, por lo que se deberán definir una serie de propiedades de referencia que permitan validar la correspondencia de la respuesta virtual con la obtenida por el material real. Según lo establecido en el apartado 2.2.5 de la presente memoria, se prioriza el valor de las propiedades obtenidas mediante la realización de ensayos, frente a los datos dispuestos por el fabricante.

Propiedades medidas		H22D38-2
Módulo Young	60,2586207	Mpa
Tensión media meseta	-1520	Mpa
Inicio densificación	0,63	

### 3.2 Modelo discreto para representación de materiales de comportamiento heterogéneo

El comportamiento de este la espuma Rohacell® ante las sollicitaciones externas, se verá fuertemente influenciado por la geometría de su microestructura. La composición de este material se basa en la unión de construcciones alveolares creando así una estructura irregular de celdas vacías que le otorgan la característica de heterogeneidad en su comportamiento.



**Figura 18.**Detalle estructura alveolar de la espuma Rohacell®

Los trabajos de F.Grennenat y O.Dorival [Ref.9 y 10] en el estudio del comportamiento heterogéneo en estructuras de hielo policristalino e interacciones entre estructuras de hielo respectivamente, permitirán comprender la característica de este tipo de comportamiento en mecánica microestructural, de forma que luego estas ideas puedan ser extrapoladas al caso de la espuma. Las estructuras de hielo policristalino se caracterizan por el desarrollo de deformaciones heterogéneas a escala intragranular debido a la gran anisotropía viscoplástica del cristal de hielo, que desemboca en una fuerte interacción entre granos y en consecuencia grandes niveles de tensión interna sobre ellos. Este efecto

desemboca en el hecho de que existe una gran aleatoriedad en la localización de puntos de ruptura de la estructura, por tanto, gran dificultad en la capacidad para caracterizar este tipo de estructuras respecto a las de un material homogéneo y continuo como es el caso del acero.

La motivación que aparece tras esta explicación es la de realizar un modelo que sea capaz de representar esa aleatoriedad del comportamiento de la estructura. Un modelo continuo no es capaz de representar este efecto, por lo que se desarrollará el código de creación de estructuras discretas a partir de elementos 1D.

### 3.2.1 Nuevo modelo basado en particiones de Voronoi

La posibilidad de la creación de un modelo discreto que sustituyera al actual modelo de elementos finitos se hizo patente gracias a la utilización del código creado por S.Marguet, profesor adjunto en la escuela INSA de Toulouse e investigador del ICA. Marguet ha trabajado en la realización de varios modelos que intentaban representar esta parte del estudio. Su primera aportación se basó en la creación de una estructura de octaedros perturbada que pretendía imitar la forma de la microestructura de este material (apartado 1.4.4) sin mucho éxito final en la consecución de la respuesta a las solicitaciones estáticas.

El planteamiento del nuevo modelo, desecha la utilización de un mismo elemento común para realizar el mallado del espacio (octaedro) y por el contrario decide utilizar unas particiones del espacio basadas en los diagramas de Voronoi (**apartado B.1 del anexo**).

El proceso para la creación del mallado discreto, comienza por la creación de una red de generadores basada en una de las estructuras de definidas por las redes cristalinas de Bravais. Se optó por la red cúbica centrada en las caras (CFC) por ser capaz de representar un número mayor de generadores a la vez que una mayor aleatoriedad tras la perturbación. El número de generadores quedará definido por un tamaño medio de arista impuesto por el utilizador del código, incidiendo así sobre la densidad de éstos en la estructura final.

El paso siguiente se define mediante de la unión de todos los generadores a partir de las particiones de Voronoi asociadas a este tipo de red. La estructura creada está formada por elementos barra 1D (unión de generadores) y elementos placa 2D que cerrarán las caras de las superficies creadas por la aparición de los elementos de una dimensión. La figura 19, resume el proceso explicado en las líneas anteriores

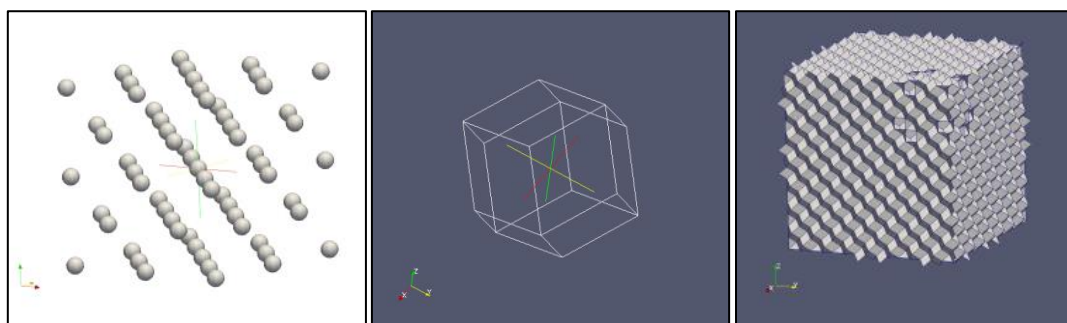


Figura 19. Red CFC, partición de Voronoi asociada y mallado creado

El siguiente paso que realiza el código es la perturbación del mallado resultante. Para ello, lo que se hará será incidir aleatoriamente sobre la repartición de los generadores sobre el volumen de espuma generado.

Para afinar el proceso de creación de este mallado de espuma, intentando así optimizar el tiempo de cálculo debido a la estructura, este mismo código identificará las aristas más pequeñas de la estructura, ya que penalizan el tiempo de cálculo, las elimina y une los nodos libres resultantes, cerrando así la estructura. El último paso a realizar es el de eliminar los elementos 2D que forman las caras de las paredes de la estructura, ya que el interés de este estudio requiere solamente de los elementos barra que la forma.

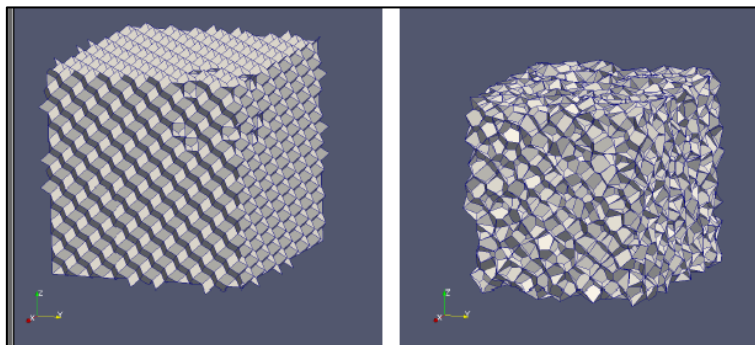


Figura... Proceso de perturbación del mallado

### 3.3 Desarrollo del nuevo modelo de espuma. Elementos 1D

Mediante el código de creación de mallas de elementos de Marguet, se podrá crear un bloque de espuma discreto formado por elementos 1D; del cual, mediante la realización de un corte, obtenerse la forma final deseada para la probeta de estudio.

La densidad de elementos que aparecen en la estructura creada se convertirá en un factor de importancia, dado que el aumento del número de estos se traduce en la realización de un cálculo mayor. Para influir sobre esta característica, se deberá actuar sobre el tamaño medio de arista, de manera que el número de generadores que aparecerán será mayor y por tanto la densidad de elementos.

Los detalles de la actuación realizada en cada uno de los siguientes apartados, se encuentra en el **apartado B del anexo**.

#### 3.3.1 Creación del modelo discreto

La creación del modelo comienza con la definición de la geometría de la probeta de espuma virtual, la cual se introducirá posteriormente en el software de elementos finitos. Para facilitar el proceso de ensayo, se decidió que la forma final de esta probeta no tenía por qué coincidir con la utilizada en los ensayos de laboratorio, pudiendo ser más sencilla. Las dimensiones del modelo virtual se presentan en la figura 20.

Definida la geometría, se actuará a través del software de creación de mallados discretos para la concepción de un bloque paralelepédico maestro de al menos **50x50x25**, mayor que las dimensiones del diseño elegido. La forma final de la probeta se obtendrá mediante una operación booleana de interferencia entre el modelo de corte y el bloque maestro de espuma en el entorno del software Abaqus (diseño y cálculo de Elementos Finitos).

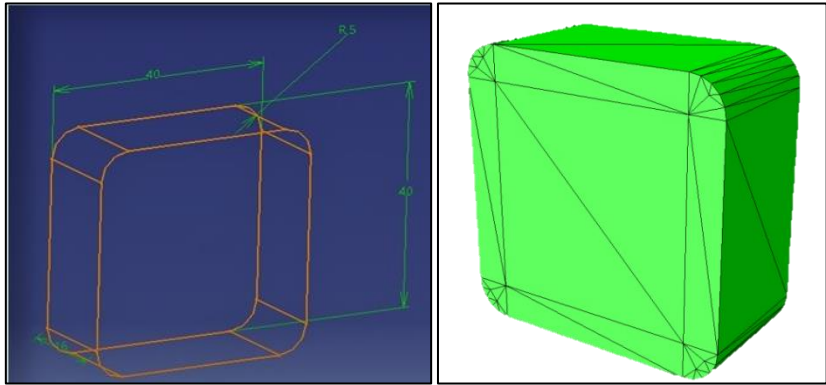


Figura 20. Dimensiones modelo de espuma discreto y modelo de corte en Abaqus

Antes de avanzar al siguiente aparatado de selección del tipo de elemento, se escogerá la densidad de elementos más apropiada para realizar el mallado de esta estructura. Se dispondrá de hasta cinco modelos de mallado distinto. La denominación seleccionada para este tipo de estructuras será **VORO + (número según el orden de creación de los modelos)**. A continuación se muestra un gráfico de la evolución del número de elementos según el tamaño medio de arista:

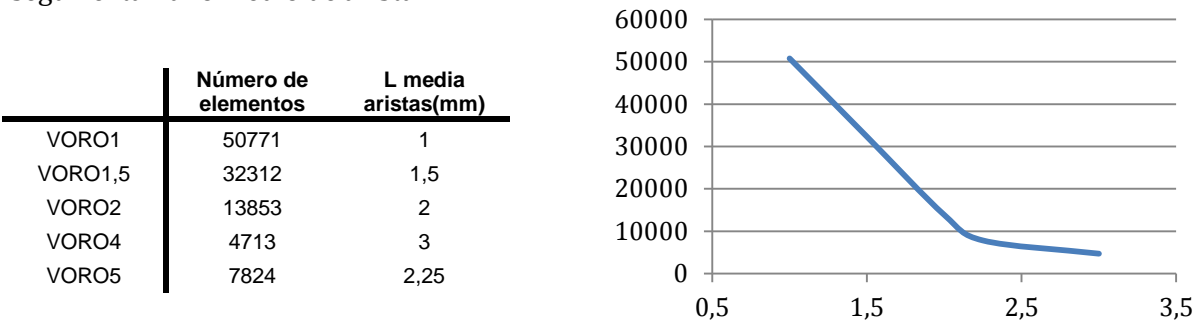


Tabla 6. Evolución del nº de elementos según el tamaño medio de arista

El criterio de selección de uno de estos modelos para la realización de las simulaciones será puramente restrictivo en cuanto al tiempo debido a que se dispone de potencia de cálculo limitada, lo que podría alargar demasiado el tiempo invertido en la parte de simulación.

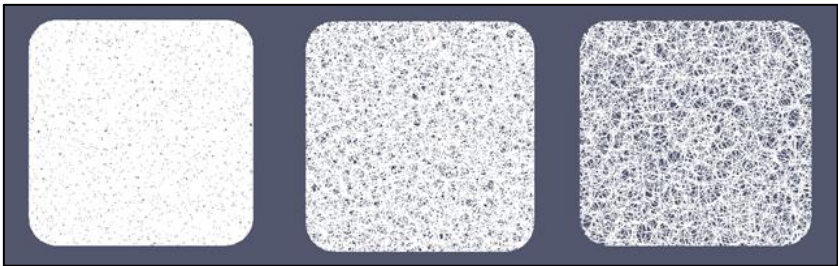


Figura 21. Modelos de espuma discreta para tamaños medios de arista de 1; 1,5 y 2mm



Trabajos anteriores realizados en el seno de este laboratorio, demostraron ya las ventajas de utilizar un tamaño medio de arista mayor en cuanto a tiempos de cálculo se refiere. La [Ref.5] (apartado B.2 del anexo) observaba que la variación entre las curvas de respuesta obtenidas en los diferentes ensayos era muy pequeña, a pesar de existir una variación enorme en el tiempo de cálculo invertido en cada ensayo (siempre dentro de unos límites de tamaño de arista, los cuales se han contemplado). Por tanto, se partirá del modelo más simple de todos, denominado **VORO4**, con la suposición inicial de que el gran tamaño medio de arista no afecte de forma significativa a la respuesta final.

El diseño del modelo final que se presenta a continuación pretende, en una primera aproximación, acercar el comportamiento de un conjunto espuma más caparazón de tejido de material compuesto al que se esperaría de la probeta compuesta para la representación de los diseños C.R.O.R.

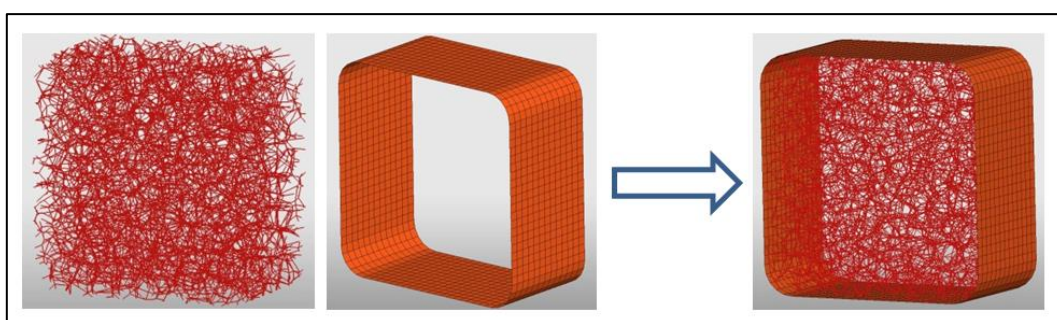


Figura 22. Composición del modelo final

El diseño final conjunto se aparcó por falta de tiempo y porque se consideró de mayor importancia el apartado de caracterización de la espuma a nivel individual. Este trabajo se transformará en una nueva línea de estudio.

### 3.3.2 Introducción de características. Selección del tipo de elemento

Tras la definición del modelo informático sobre el que se realizará la definición de cualidades en pro de obtener esa similitud de comportamiento virtual y real, se introducirá este diseño en el entorno informático de trabajo del software de cálculo de elementos finitos Radioss ® (apartado B.3 del anexo). Radioss® se presenta como un módulo independiente dentro del paquete del desarrollador Altair Engineering®, el cual se encarga de la realización de las simulaciones creadas a partir del resto de módulos del grupo. El otro programa principal que se utilizará para el propósito de la definición del modelo es Altair HyperCrash, un módulo del paquete especializado para la representación de situaciones de impacto (crash) o evaluaciones de seguridad. La interfaz de este permite una rápida introducción de las condiciones de contorno que envuelven este tipo de situaciones así como la definición tanto de materiales, propiedades, etc. de las piezas que se introducen el programa.

En los apartados iniciales de esta sección se habló de la heterogeneidad del comportamiento de este material y la definición del modelo discreto consecuente. La aleatoriedad de definición de esfuerzos en la estructura real de la espuma hace que el comportamiento individual de las barras no tenga por qué corresponderse con el de la

solicitud general externa. El análisis, por tanto, deberá revertirse hacia niveles más inferiores del mallado, es decir, hacia un estudio individual de los elementos barra, de forma que se pueda observar la influencia que tiene la forma de aplicación de propiedades por elementos a nivel global de la estructura.

Para proceder a la realización de simulaciones en el entorno de HyperCrash, toda pieza que aparezca en el programa debe tener asociado un material y una propiedad.

El interés de la elección de un material, viene dado por el propósito del estudio de la ruina de los elementos de forma individualizada, por lo que se buscará la definición de una ley material capaz de reproducir este efecto. La selección recaerá sobre la **ley material de Johnson-Cook**. Se trata de una definición de material elástico-plástico, con una zona de actuación lineal por debajo de un límite de fluencia establecido y un comportamiento plástico por encima de este. El programa requerirá la definición de los componentes anteriormente mostrados para la correcta aplicación de la ley material. Posteriormente se verá que esta decisión no es muy importante en el desarrollo final de las simulaciones.

De otro lado, la elección de una propiedad que asociar a la pieza servirá como definición del tipo de elemento 1D que se encargará de modelar ese comportamiento elástico plástico capaz incluso de llegar a la rotura en cada una de las barras. Los tipos de propiedades planteados serían el *type BEAM* y el *BEAM type SPRING*.

El elemento *BEAM*, hace referencia a la propiedad tipo 3 de este código, definida según la teoría de vigas de Timoshenko y capaz de representar esfuerzos virtuales de deformación debidos tanto a esfuerzos axiales, como torsionales o de flexión tanto en  $z$  como en  $y$ . La definición principal de este elemento se hace mediante la identificación de los valores de sección de la viga (área), inercias para flexión ( $I_{yy}$ ,  $I_{zz}$ ) y torsión ( $I_{xx}$ ).

Por su parte, el elemento *BEAM type Spring*, propiedad 13; comparte la cualidad de definición de comportamiento de viga de la propiedad 3, además de las cualidades mecánicas de la definición de muelles y resortes. La elección de esta propiedad frente a la anterior tiene la gran ventaja de poder influir individualmente en la definición de los 6 modos de deformación posibles, pudiendo inducir a cada uno de ellos una ley de comportamiento distinta, sea por la introducción de parámetros en cada una de las hojas de propiedades o mediante la introducción de una función con ese objetivo. La definición de este tipo de leyes de comportamiento elimina la dependencia de la ley material sobre la pieza, siendo esta propiedad la que modele todas las características del comportamiento. La propiedad 13 puede representar tanto funciones de comportamiento lineales como no lineales, según la forma en la que se hayan definido éstas **[apartado B.4 del anexo]**.

La conclusión llevada a cabo tras la presentación de ambas propiedades, es que para el interés de este estudio se optará por un tipo de elemento más polivalente como el *BEAM type Spring*. Esta propiedad representa ventajas frente a su adversaria en la posibilidad de definición de funciones de comportamiento individual, la posibilidad de análisis de estudios cualitativos de influencia de cada uno de los tipos de solicitud y la no necesidad de identificar los parámetros de la ley material. Trabajos similares del departamento como el P. López **[Ref.4]**, donde el trabajo con elementos Beam arrojó resultados poco esperanzadores sirvieron para reforzar el razonamiento de la elección de la propiedad 13 para la representación del comportamiento.



Seleccionado el elemento, en apartados posteriores se atacará la parte más costosa de este estudio, la modelización de la respuesta de la espuma Rohacell®, a partir del modelo de VORO4 y con los elementos Spring-Beam a falta de la definición de propiedades.

### **3.4 Modelización de la respuesta**

El grueso del trabajo realizado durante la estancia en el Instituto Clément Ader, se centrará en la parte de la modelización del ensayo de compresión. A partir de la representación creada en el entorno informático se buscará que la respuesta del ensayo virtual se corresponda con la del mismo ensayo sobre el material real que se realizó en las instalaciones del propio Instituto.

A partir de la diferenciación de las tres partes que forman la curva de respuesta del ensayo de compresión (apartado 2.1.2), se deberá establecer una estrategia de modelización para cada una de ellas, limitados por las características del elemento escogido. Por tanto, mediante la utilización del elemento Spring-Beam, deberá centrarse el análisis a la variación de propiedades de las barras, mediante un proceso iterativo de aproximación a la respuesta deseada; y a la introducción de alguna otra propiedad que pueda modelizar las condiciones de contacto entre los elementos

Dentro del módulo HyperCrash de Altair Hyperworks, se implementará un modelo de ensayo de caracterización estática de compresión con el que poder realizar el seguimiento de la respuesta, con la cual comparar el modelo real y el virtual.

#### **3.4.1 Estrategia de modelización**

La primera de las tareas a definir en el comienzo de todo estudio de este tipo, es la estrategia para el cálculo de las propiedades de los elementos barra que forman la estructura. Para ello, nos apoyaremos en algunas ideas de trabajos similares como el de [Ref.4], donde se trabajaba sobre la base de los elementos Beam, los cuales comparten ciertas propiedades con el tipo de elemento escogido para este estudio (Spring-Beam). Dado que este proceso tiene su fundamento inicial en las propiedades mecánicas de esta espuma, se aceptará correspondencia directa entre la pendiente de la zona elástica de la respuesta en tracción y la equivalente para la zona de compresión.

Debido a la aleatoriedad de las direcciones de las barras que forman las celdas de la microestructura de la espuma de polimetacrilimida, ante una acción exterior en una dirección concreta, el comportamiento de cada una de ellas puede ser distinto al de la acción global. Para poder definir un comportamiento de las barras lo más realista posible, se deberá tener en cuenta la incidencia de cada tipo de sollicitación sobre la estructura.

Volviendo sobre la estrategia de obtención de los valores de las propiedades, se impone que la primera parte de la respuesta en compresión de la curva lleve asociada la modelización de la parte del ensayo de tracción por compartir características de la pendiente de la zona elástica. La definición de la curva de tracción llevará impuesta la representación del punto de rotura frágil de este ensayo, quedando así definidas las

propiedades de rigidez en tracción-compresión ( $K_x$ ) y la rotura en tracción ( $\delta_{max}$ ) de la propiedad Spring-Beam.

La segunda parte de la curva (meseta), no presenta una solución tan intuitiva como podía ser la anterior zona lineal, dado que comienza una zona de plastificación no lineal. Como solución a este problema, se modelizará esta parte de la respuesta mediante la introducción de una función de comportamiento para cada una de las solicitaciones posibles que aparezcan durante el ensayo, en la opción así definida dentro de la propiedad Spring-Beam, pudiendo clasificar a continuación la influencia de cada una de ellas sobre la respuesta final.

Para la última parte de esta curva de respuesta, la densificación, se han puesto todas las esperanzas de modelizar esta parte a través de una condición de contacto entre barras mediante una interfaz que simule la imposibilidad de penetración entre las propias barras y por tanto la creación de ese sólido continuo que se describe en el comportamiento de la espuma Rohacell®.

Recapitulando, los pasos a seguir en la estrategia de modelización son:

1. Búsqueda del valor de la pendiente de la respuesta lineal ante una solicitud exterior de tracción dada la coincidencia de módulos elásticos en tracción y compresión.
2. Búsqueda del valor de rotura en tracción para hacerlo coincidir con los valores reales y que sirva de referencia para las propiedades individuales aplicadas a los elementos 1D de la estructura. Junto con el punto 1 definirán la zona lineal de la curva de respuesta global.
3. Imposición de una ley de comportamiento plástica no lineal a cada una de las solicitaciones a través de una función en la definición de la propiedad Spring-Beam. El objetivo será observar la influencia de cada una de ellas sobre la respuesta global para intentar afinar la curva lo máximo posible.
4. Modelización de la zona de densificación mediante una condición de contacto impuesta sobre todos los elementos de la estructura y que simule el contacto real de las paredes de las celdas de la espuma.

### 3.4.2 Introducción de propiedades en el modelo

El inicio de la aplicación de la estrategia de modelización, coincide con la introducción del modelo discreto de espuma dentro del módulo de análisis de elementos finitos HyperCrash; donde se implementarán las condiciones de contorno necesarias para la representación del ensayo estático, primero de tracción y luego de compresión. Ambos ensayos son análogos, siendo el único elemento diferenciador el sentido de aplicación del desplazamiento.

Con el modelo importado, se le **asignará una ley material** al mismo (a pesar de que no tenga influencia posterior con la introducción de la propiedad Sp-Beam) en la cual debe existir coherencia en sus valores para que el compilador no indique un error de unidades en el análisis.

El siguiente paso del proceso se corresponde con la definición de las propiedades; que al igual que la ley material, se asignan a una pieza definida (el modelo). El tipo de elemento elegido para esta caracterización es Spring-Beam para elementos 1D.

De la parte de definición externa a la pieza aparecerán las condiciones de contorno para la representación del ensayo:

- Se modelizará la existencia de las mordazas de aplicación de la sollicitación exterior mediante el uso del elemento *Rigid body*. El movimiento de este *Rigid body* se gestiona a través de un único punto maestro que será el elegido a su vez como punto de aplicación de la acción exterior y como punto de referencia para el control del desplazamiento. Se crearán dos estructuras de este tipo para abrazar la parte inferior de la pieza y la superior.
- La acción exterior se representa mediante la imposición de una velocidad sobre los puntos definidos por los *R.body*; constante del ensayo y fijada en 6mm/ms, mucho mayor que la del ensayo real para acelerar el proceso de cálculo, dado que no se observaban variaciones en la respuesta tras el cambio de velocidad.
- La parte inferior de la pieza, se fijará para impedir el desplazamiento impuesto sobre una de las caras mediante una condición de contorno que bloquee los 6 grados de libertad del *Rigid body inferior*. El *superior* presenta otra condición de contorno que sólo le permite realizar movimiento vertical (paralelismo).

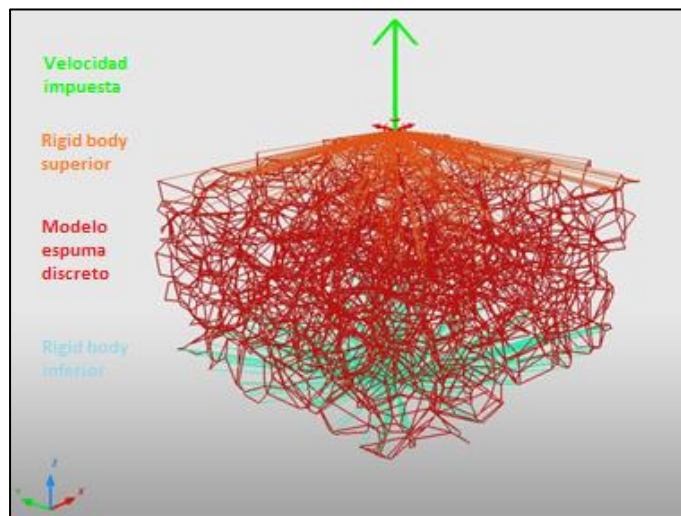


Figura 23. Partes del modelo discreto

A partir de este punto, la introducción de valores de propiedades se convierte en un proceso iterativo, hasta la optimización de la respuesta del modelo buscada. El comienzo de este estudio se basa en la teoría de barras de Timoshenko, por la similitud de comportamiento entre el elemento 1D elegido para la representación de propiedades (Spring-Beam) y el elemento viga (Beam). El cálculo de valores de las constantes de rigidez para la obtención del resto de propiedades mecánicas que se introducirán en la tabla de propiedades del elemento se obtiene de la teoría de elasticidad y resistencia de materiales.

Las ecuaciones para el cálculo de estas propiedades, se recogen en el **apartado B.5 del anexo** de la presente memoria. De la observación de estas ecuaciones se sustrae la dependencia general sobre un pequeño grupo de factores. Junto con los citados anteriormente, se definen como variables de interés para estudios realizados posteriores:

- Radio de las barras:  $R_{\text{barras}}$
- Módulo de Young:  $E$
- Tensión máxima en tracción:  $\sigma_{\text{max}}$
- Límite elástico de la zona no lineal en la ley de comportamiento impuesta para las propiedades de las barras:  $\sigma_y$
- Deformación máxima para ruptura de elementos en cada tipo de sollicitación:  $\delta_y$

### 3.4.3 Modelización de la zona lineal

El comienzo de las simulaciones viene dado por la definición de propiedades de la sollicitación de tracción, que coincide con la definición de la parte inicial del modelo. Se aplicará una velocidad de desplazamiento impuesta de 6mm/ms en la dirección de separación de las mordazas virtuales.

El parámetro principal de búsqueda, es la pendiente de la curva de respuesta de tracción (punto 1 de la estrategia de modelización). El valor que se pretende de este parámetro, será el obtenido en los ensayos de caracterización, dado que el interés de este estudio reside en el bloque a partir del cual se crearon las probetas de la experimentación.

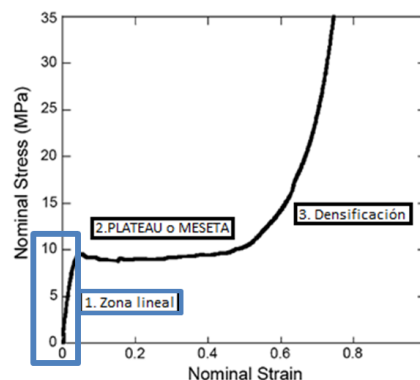


Figura 24. Modelización zona lineal de la curva

Dentro de las consideraciones iniciales, estará la necesidad de la definición de los parámetros  $R_{\text{barras}}$  y módulo de Young ( $E$ ), como únicas variables que intervienen en el cálculo de propiedades. Dada la relación directa de cálculo entre ambas incógnitas, el modo de proceder será fijando uno de los parámetros (en este caso  $R_{\text{barras}} = 0.6\text{mm}$ ) y a partir de la variación del otro, obtener el valor deseado de la pendiente. Este valor se situara en torno a los 65MPa y proceso iterativo se obtiene con un valor del módulo virtual de las barras de  $E=3500\text{MPa}$  habiéndose aproximado a ese valor.

Utilizando el mismo modelo de ensayo; se aborda el segundo hito definido en la estrategia, la definición del punto de rotura de las barras a tracción para una resistencia a este esfuerzo del modelo global de 2.2 MPa. La rotura frágil de este tipo de sollicitación se modela mediante el parámetro de la hoja de propiedades  $\delta_{\text{max}}$ , definido como:

$$\delta_{max} = \frac{E}{\sigma_{max}}$$

Siendo  $\sigma_{max}$  la variable a la que se tendrá acceso en el proceso de iteración (resistencia del material) y  $\delta_{max}$  se define como deformación para no crear confusión en la introducción de valores en el módulo del bloc de notas de HyperCrash.

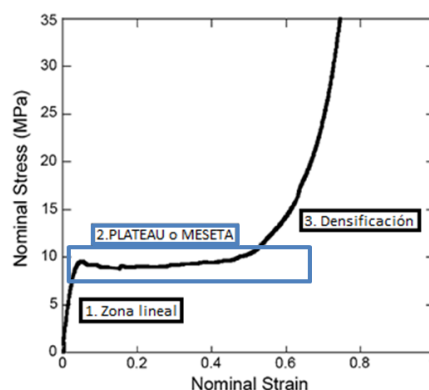
El valor buscado se obtiene mediante interpolación directa de los resultados de las simulaciones; considerando como punto de ruptura la desaparición de un gran número de elementos que han sobrepasado su límite elástico. Para un valor de **resistencia en tracción de 85MPa** se obtiene un punto de rotura entorno al objetivo.

Previo al cambio de modelo se realizará una última comprobación sobre este tras la suposición de fijar uno de las variables de interés al comienzo del estudio. Ahora se intercambiará la condición de parámetro fijo del Radio de las barras por la variable del módulo E y viceversa. La introducción de valores del radio de 0.4 y 0.8 mm produce un cambio enorme en la pendiente que implicaría la imposición de un módulo de Young de las barras, muy alto para el primer caso y uno muy pequeño para el segundo; siendo los calores obtenido poco realistas y de gran variabilidad posible en caso de necesidad de aplicación de un nuevo cálculo de propiedades de la curva.

**Los parámetros utilizados en la simulación de los elementos de este apartado se recogen en la tabla 8 del anexo.**

### 3.4.4 Modelización de la zona plana

Una vez definidas las propiedades de las barras a través del proceso de modelización de la zona lineal, se tomarán como fijos estos valores a expensas de necesitar cierto ajuste fino en términos de pendiente o rotura en tracción de las barras. El nuevo modelo de ensayo requerirá solamente de un cambio en la dirección de aplicación de la velocidad sobre el módulo *Rigid body superior* (figura...).



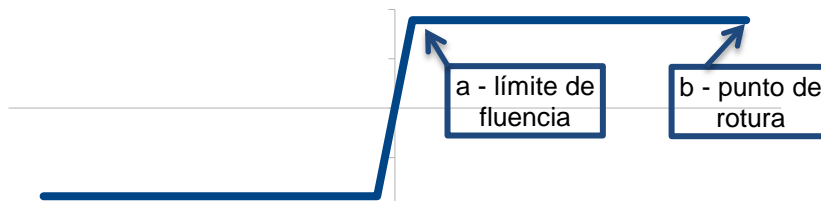
**Figura 25. Modelización zona plana de la curva**

La primera aproximación partía de la imposición de un límite de rotura a compresión junto con el ya conseguido en el apartado anterior. Tras la realización de diversas simulaciones de este ensayo, se produjo un cambio de mentalidad motivado por la

imposibilidad de representar la respuesta deseada imponiendo que los modos de rotura predominantes coincidieran con la sollicitación externa de la estructura. Debido a que en el código de HyperCrash, un límite no definido se convierte por defecto en un valor de rotura casi infinito, es decir que no se producirá la rotura del elemento mediante esa sollicitación.

Para la comprensión de este efecto se volvió sobre el ensayo de tracción inicial para realizar una comparativa de la influencia de cada una de las sollicitaciones posibles a la rotura de las barras. Se generarían por tanto cuatro nuevos ensayos para la ley de comportamiento en tracción compresión, flexión, cizalladura y torsión. El resultado de este análisis desembocó en que la aplicación de diferentes sollicitaciones tenía influencia sobre el valor de la pendiente de la respuesta obtenida en cada caso; pero sobre todo se observó una gran diferencia en el punto de ruptura debido a la sollicitación de cizalladura, mucho más temprana en este tipo. La síntesis anterior produjo un cambio en la forma planteada para modelizar esta segunda parte del gráfico, requiriendo de nuevo la comparación de las leyes de comportamiento aplicadas a cada una de las sollicitaciones.

Se planteará la introducción de una ley de comportamiento a cada una de las propiedades mecánicas por separado (**ID\_funct<sub>i</sub>**), según la forma que aparece en la imagen 26. La función describe una zona inicial de comportamiento lineal que buscará corresponderse con las propiedades ya calculadas en cada uno de los casos de sollicitación; y una zona posterior plana de deformación no lineal para la plastificación. Este comportamiento se aplicará de forma idéntica en ambos sentidos de aplicación del esfuerzo.



**Figura 26. Forma de la función de comportamiento**

La introducción de la función de comportamiento obliga a cambiar la definición del coeficiente para la rigidez de la sollicitación sobre la cual se ha definido ésta, de forma no interfiera en los valores que posteriormente se calcularán en la función de comportamiento para simular la parte lineal como si esta rigidez sí estuviera definida. Se le aplicará por tanto un valor unitario al término de la rigidez en el caso que corresponda para cada tipo de ensayo.

Siguiendo con la tarea de identificación de la influencia de las sollicitaciones en la forma de respuesta, se simulará el comportamiento de la zona lineal y parte de la zona de deformación plana de forma que pueda apreciarse la tendencia sobre la curva de respuesta. **De los gráficos 12 y 13 del apartado II.I del anexo** se desprende que hay una sollicitación que despunta sobre las demás en el objetivo de acercarse a la forma final deseada para la curva. Se tomará entonces como **parámetro de referencia la sollicitación de cizalladura** y será a esta a la que se le aplique la ley de comportamiento en pro de afinar los valores obtenidos en pasos anteriores para acercar la respuesta del modelo a la de la espuma real ensayada.

De la observación de los resultados obtenidos para las curvas, se puede sustraer la influencia de cada una de las coordenadas que definen el parámetro “a” en la función de comportamiento y que serán de utilidad para posteriores ajustes tanto de la pendiente de la curva (zona lineal) como de la ordenada vertical (valor de la tensión) a la cual se encuentra la zona de plastificación plana (meseta).

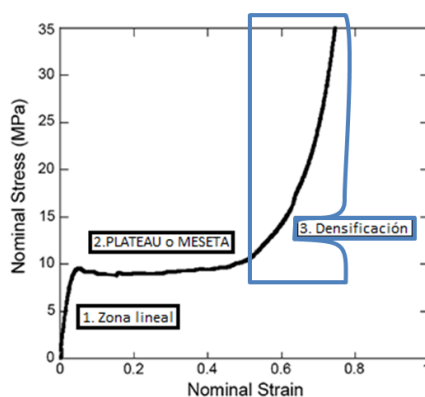
- El aumento del valor de la abscisa de “a” (valor de la deformación de la fluencia de las barras) hace disminuir la pendiente del tramo inicial de la curva de respuesta.
- El aumento del valor de la ordenada de “a” (valor de la tensión de fluencia de las barras) aumenta la ordenada del nivel medio de la zona plana, es decir, eleva el valor de la meseta.

Definida la influencia de la función sobre los parámetros de las propiedades definidas para los elementos Spring-Beam y la solicitud de cizalladura como el parámetro de referencia, el siguiente paso pretende afinar los valores de esta función. Éste, se realizará en el siguiente apartado debido a que la aplicación de la condición que permite la modelización del último tramo de la curva, afectará a los anteriores.

**Los parámetros utilizados en la simulación de los elementos de este apartado se recogen en las tablas 9 y 10 del apartado II.II del anexo.**

### 3.4.5 Modelización de la densificación

El origen de esta parte de la curva se sitúa en el inicio del contacto entre paredes de las celdas de la microestructura de la espuma, inicialmente vacías. Tras el avance del proceso de deformación, la acción de compresión externa produce una aproximación de las caras opuestas de estas celdas hasta un punto donde desaparece ese espacio interior y se produce el contacto entre éstas paredes. El sólido comenzará a comportarse como un sólido continuo dificultando el avance del proceso de deformación de forma exponencial.



**Figura 27. Modelización zona de densificación**

La estrategia de modelización para esta parte, se basa en el conocimiento del fenómeno natural explicado anteriormente. Para no incurrir en un error de cálculo que detenga el proceso de simulación debido a la interferencia de elementos se propone la reproducción del contacto real entre elementos de la microestructura a través de la definición de una interfaz de las que incorpora el módulo HyperCrash.

En el **punto B.8 del anexo** se realiza una presentación de la definición de interfaces en el programa, los tipos más interesantes para su aplicación y las propiedades del elemento elegido. De este análisis se extrae que:

- El Gap es una separación impuesta por el usuario, ya sea por defecto o en el caso de buscar otro tipo de aproximación, manualmente; que marca la zona en la que comienza el conflicto entre las dos partes del contacto. Cuando un nodo atraviesa la frontera creada por el Gap, el software de cálculo interpreta que se está empezando a producir tal contacto entre elementos y aplica una resistencia a la realización de tal efecto modelizada mediante un efecto de repulsión como si de un resorte se tratara.

La interfaz elegida para la definición del contacto entre elementos será la número 11 (**/INTER/TYPE11**). Esta característica se define expresamente para la representación de contactos entre elementos 1D y permite la activación de la opción de la función “auto-impacto” (self-impact) durante la definición de las características del contacto. En este caso, la propia estructura se comporta indistintamente como elemento maestro y esclavo identificando todos los contactos posibles entre los elementos barra que la forman.

Siguiendo con el estudio de modelado de la zona plana, la continuación de las simulaciones implica que debe aplicarse en todo momento la condición de contacto ya que esta produce variaciones en la forma final de la respuesta como quedará demostrado en el gráfico 1. El principal elemento de ajuste son las coordenadas del punto definido como “a” en la función y los valores objetivo se tomarán del ensayado de la probeta de espuma H22D38-2 (**apartado 3.1**).

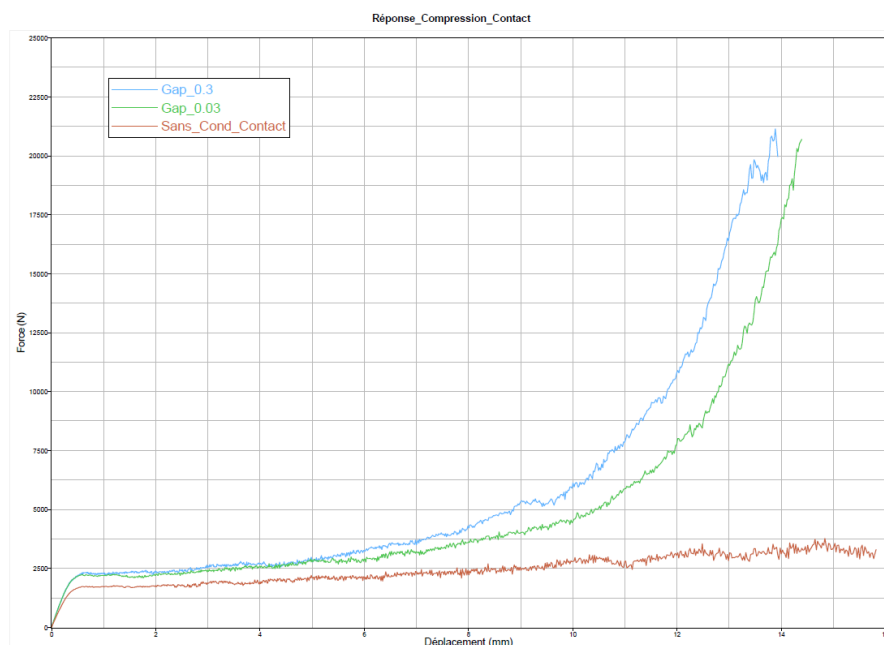


Gráfico 1. Influencia de la imposición de la condición de contacto



Tras la observación de resultados, a la influencia de la variación de las coordenadas del punto “a” de la función, habrá que sumar la aportación del valor de ruptura  $\delta_{\max}$  de la sollicitación de cizalladura. Un valor menor de este parámetro produce una rotura prematura de las barras haciendo que la ordenada de la meseta de la curva descienda.

En este punto ya se está en condición de aproximar los parámetros de la pendiente y la altura de la parte plana de la evolución de la curva dado el conocimiento que se tiene de la influencia de los parámetros que la definen. Posteriormente podrá realizarse el ajuste de la zona de la densificación, que ya puede apreciarse en los resultados obtenidos hasta el momento y que coincide con el objetivo de representación del efecto que se estaba buscando. En el **gráfico 14 (Representación más detalle)** del anexo se puede observar la forma de ciertas curvas cuyas características quedan presentadas en la **tabla 10**. A partir de este punto, mediante ensayo-error se buscará la aproximación de valores hacia los esperados, quedando definida como curva objetivo, en el gráfico anterior, una aproximación cercana a lo que se buscaba.

### **Ajuste de la condición de contacto**

Centrándose ahora en el ajuste de la última zona de la respuesta de la curva, el primer punto en el que se centrará el interés será en ver la influencia del parámetro **Gap<sub>min</sub>** que se augura como el de mayor influencia de la definición de esta propiedad. Los modelos denominados como **Gap0.3** y **Gap0.03** en la **tabla 11 del anexo**, comparten características con los anteriores modelos salvo la distancia de creación del gap (**Gap<sub>min</sub>**). El resultado quedará reflejado sobre el gráfico 1 donde ya se apreció el efecto de la introducción de la condición de contacto sobre todas las partes que forman la curva de respuesta. La parte positiva de este escollo, es que una vez introducida esta condición, no existe gran variabilidad en la parte inicial de la curva si se varían los valores de condición de contacto; lo cual es realmente interesante para este estudio. El efecto de aumentar el valor del Gap en un factor 10, se traduce en una traslación de la zona de densificación hacia desplazamientos menores, es decir, este efecto se produce más temprano.

Por otro lado, se deberá comprobar la influencia del resto de parámetros que pueden influir en esta condición de contacto. Estos serán los casos de **I<sub>GAP</sub>**, **St<sub>Fac</sub>**, **St<sub>Fac</sub> + Gap**. La explicación de todos estos factores aparece **en el apartado B.9 del anexo y su influencia en la tabla 11 y gráficos 15, 16, 17 y 18**. Sobre la influencia de todos los parámetros involucrados en la definición de la condición de contacto, se puede concluir que salvo la definición de la distancia del Gap, el resto de parámetros apenas tienen repercusión sobre el modelo.

### 3.4.6 Curva resultado

Puesto que ya se han definido todos los parámetros necesarios para la elaboración de una aproximación a la respuesta de una espuma de polimetacrilimida ante una sollicitación de compresión, será el momento de afinar los valores que se han conseguido a través de la consecución de los hitos de la estrategia de modelización a lo largo de todo este estudio.

Desgraciadamente, por falta de tiempo, se priorizó la realización de otras comprobaciones, como las de la realización de otros modelos de mallado más denso para establecer la relación entre ellos o la comprobación de que la velocidad impuesta en los ensayos no era excesivamente grande para representar un ensayo de caracterización mecánica simple.

Por tanto, el modelo final escogido será uno de los ya presentados anteriormente. Concretamente el **denominado en la tabla 11 como Gap0.3**, el cual tiene impuesta la condición de contacto con todos sus elementos por defecto, salvo el del Gap<sub>min</sub>. Los valores finales de la propiedad se recogen a continuación en la tabla 7:

**Tabla 7. Propiedades finales modelo**

Modelo	E barras (Mpa)	R barras	Lo	A (mm2)	Kx (N)	Iy (mm4)	Kflex (Nmm2)	Coordenadas func. Comportamiento (a)			
VORO4	3500	0,6000	3	1,130973355	3958,407	0,101788	356,257	δruptura	Coord Y	Coord X	Gap
G	J	Nu	Ktors (Nmm2)	Kcis	Φy	Densidad barras (g/mm3)	Masa barras (g)				
1346,154	0,204	0,300	274,044	101,536	3,678	0,0001246	0,0004228				

Las características de este modelo en comparación con las esperadas, se presentan en la tabla 8. A pesar de no ser una aproximación enormemente precisa, el conocimiento de la influencia de cada uno de los parámetros en la curva de respuesta permitirá de forma sencilla conseguir una respuesta de este modelo mucho más fiel con mucho menor esfuerzo en futuros trabajos sobre esta línea.

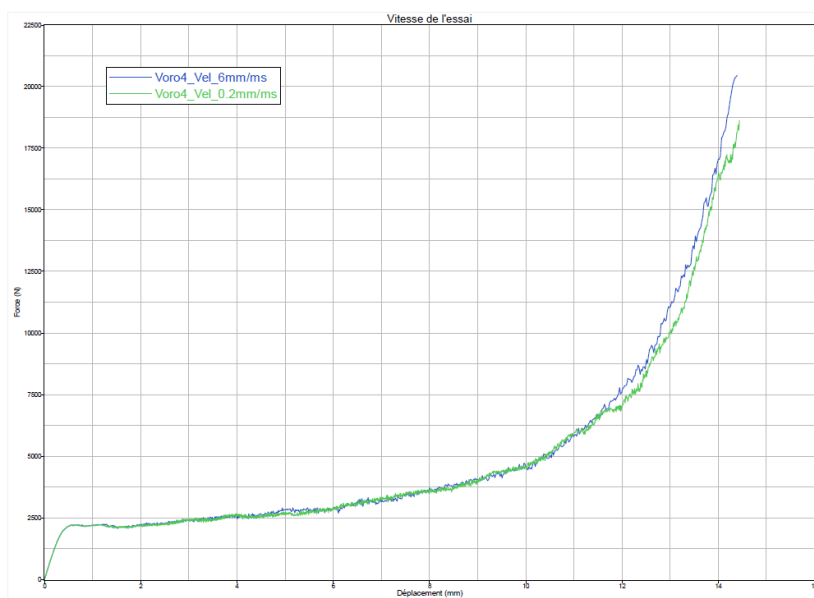
**Tabla 8. Comparativa entre el modelo conseguido y la curva real del ensayo**

Propiedades medidas	H22D38-2	Modelo discreto	
Módulo Young	60,2586	61,816	Mpa
Tensión media meseta	-1520	-1413	Mpa
Inicio densificación	0,63	0,67	

### 3.4.7 Comparativa con otros modelos

Entre los últimos apartados que se consiguieron abordar en este estudio, se encuentra la realización de una comparativa entre la realización de los estudios anteriores a diferentes velocidades de ensayo, así como otra de modelos compuestos por diferentes densidades de elementos. Ambas comparativas, nacen de la necesidad de agilizar los tiempos invertidos en las simulaciones, debido a la gran cantidad de éstas que se tuvo que realizar. Entre las posibilidades que se planteaban para disminuir ese tiempo de cálculo, surgiría la utilización de un modelo de menor densidad de elementos o el aumento de la velocidad del ensayo para así disminuir el tiempo de simulación necesario.

La realización de los ensayos a una velocidad de deformación excesivamente alta, podían suponer que la ruina de la estructura no simulara un comportamiento cuasi estático, sino que representara una respuesta de tipo dinámico, con la consecuente influencia sobre la curva. Se realizó la misma simulación sobre el modelo con los mismos parámetros del último ensayo de compresión pero a una velocidad un orden de magnitud menor, unos 0.2mm/ms. En cuanto a la respuesta, resultados prometedores ante un cambio poco significativo en la respuesta del ensayo de compresión entre los modelos. Esta afirmación puede observarse en el gráfico 2.



**Gráfico 2. Comparativa de respuesta ante un cambio de velocidad**

La otra posibilidad que se planteó, fue la utilización del resto de modelos discretos de los que se dispone para realizar una comparativa entre respuestas de modelos de diferente densidad de mallado, así como la búsqueda de una relación matemática que permita establecer este tipo de comparativa. Estos modelos comparten en los trabajos de S.Marguet y su algoritmo de creación de bloques de espuma discretos compuestos por elementos 1D según la teoría de particiones de Voronoi. Las características de los diferentes modelos se muestran en el **apartado B.10 del anexo**.

Debe tenerse en consideración que propiedades como la densidad de las barras del modelo o la masa de éstas, se definen como función del número de elementos que formaban cada uno de los diseños y que por tanto, al cambiar el número de elementos entre modelos, también lo harán el resto de cualidades.

A partir del modelo simple de un sistema con muelles presentado en el anexo y el razonamiento expresado, se llegará a una ecuación que relaciona el número de elementos que forman la malla, con las constantes que se introducen, por tanto como propiedades en las barras. Para un sistema 1D:

$$\frac{k'}{k} = \frac{n}{n'} \quad k' = \frac{k \cdot n}{n'}$$

Donde “  $k'$  ” es el valor de las nuevas constantes de rigidez para los modelos de diferente densidad. Los valores de la función de comportamiento para la sollicitación de cizalladura también se verán afectados por este efecto y en consecuencia se les aplicará el mismo factor de conversión.

La **tabla 12** en el final del anexo, muestra los nuevos valores para los modelos VORO 2,3 y 5 calculados a partir de las relaciones siguientes:

**Tabla 9. Relación de propiedades entre modelos**

Modelos	Nº elementos	Ratio (n/n')
<b>VORO 4</b>	4713	1
<b>VORO 5</b>	7824	0.602377
<b>VORO 2</b>	13853	0.340215
<b>VORO 1.5 (3)</b>	32312	0.145859

Por último, el resultado de la aplicación de estos ratios a las propiedades y su posterior simulación, se podrá apreciar **en el gráfico 20 del apartado II.I del anexo** presentado a continuación. Como se observará en tal gráfico, hay ciertas diferencias en cuanto a la zona inicial de la pendiente y a la final de densificación sobretodo en modelos de mayor tamaño. Aun así se considerarán resultados esperanzadores por la falta de tiempo de reflexión para paliar estas diferencias y ya que se trabaja con modelos donde la densidad de elementos es mucho menor que la que se pretende utilizar en el mallado de los prototipos.

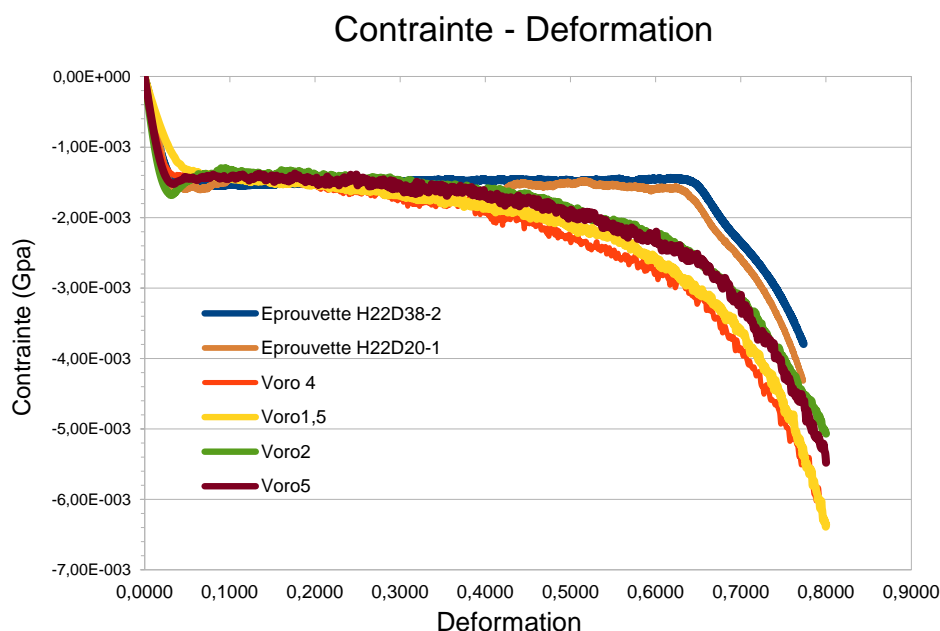
### **3.4.8 Conclusiones. Comparación de la respuesta del modelo discreto con la real**

Como última aportación del trabajo de modelado, se realizará una comparación de los modelos discretos obtenidos tras la consecución de este estudio junto con varias de las pruebas realizadas sobre probetas reales de la espuma Rohacell 71XT en el laboratorio de ensayos del Instituto Clément Ader.

Concretamente se representarán las probetas de altura 22 mm, en sus dos diámetros, como situación intermedia de todos los estudios realizados junto con los cuatro modelos obtenidos en el estudio anterior.

Sobre las respuestas de los cuatro modelos que se presentaron anteriormente, muestran un esperanzador parecido tanto en la zona inicial de las curvas como en el inicio de la zona intermedia, sobre todo para los modelos de una densidad de mallado menor (2, 4 y 5). La parte final se separa algo más de la situación real debido a que es realmente difícil la consecución de esa parte intermedia plana en la que se produce repentinamente el proceso de densificación. A lo largo de todo el estudio, se ha comprobado la capacidad de llegar a un modelo que represente perfectamente las dos primeras fases de la respuesta, obteniendo la parte plana sin ningún problema. Desgraciadamente, la aplicación de la condición de contacto influye en todos los estados de la curva cambiando incluso la pendiente inicial de la misma y obligando a reconfigurar los valores de propiedades obtenidos. Sin embargo, es la única forma encontrada para la representación de la última

parte de la curva a través de un aumento tan pronunciado de la tensión necesaria para continuar con la deformación. A pesar de que la curva no coincide con los valores reales, visualmente recuerda mucho a la respuesta esperada; y la posibilidad de influir sobre las tres partes de forma individual ya se considera un éxito para el objetivo que se buscaba dentro del estudio y del tiempo que se disponía tras la gran cantidad de problemas que aparecieron a lo largo de su realización.



**Gráfico 3. Comparativa modelos virtuales con la respuesta real**

### 3.5 Conclusión de la fase de modelado

Tras la realización de las dos comparativas previas a este apartado, se plantean nuevas vías de realización de cambios sobre las propiedades de la curva, como puede ser una nueva velocidad de ensayo a niveles cuasi estáticos para ver si la respuesta es capaz de arrojar una zona plana más larga o el modelo es limitado en ese sentido, lo cual le haría perder valor. Hasta este punto, se considera un resultado muy esperanzador, ya que como se demostró, sin la aplicación de la condición de contacto se era capaz de modelar perfectamente las dos primeras zonas de la respuesta y la hipótesis de la aplicación de una condición de contorno para la emulación de la densificación fue todo un éxito. Lamentablemente, la falta de tiempo en las fases finales del estudio impidió la comprobación de otras posibilidades.

## Perspectivas

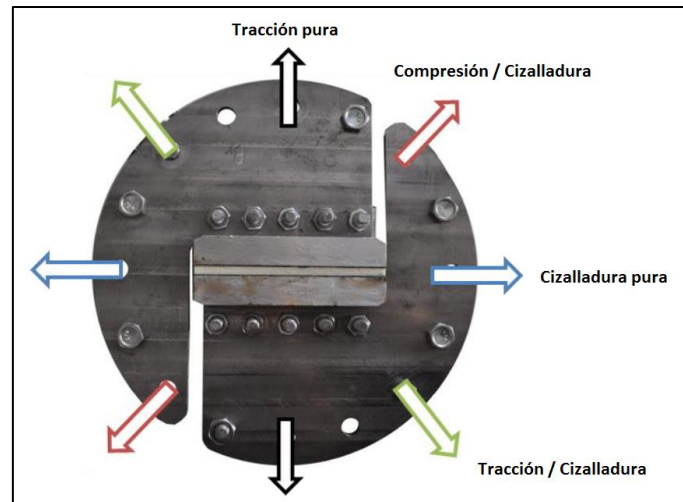
En el siguiente apartado se plantean varias líneas futuras de trabajo en referencia al trabajo de modelización de esta espuma de polimetacrilimida Rohacell® 71XT. No se plantearán mejoras a los trabajos realizados en el apartado 5, ya que forman parte de un estudio continuo de análisis de prototipos, todavía en fase de evolución por lo que se esperan avances mediante el seguimiento de la línea actual marcada.

El estudio que se ha realizado sobre este material, tiene dos fases de actuación. Una primera fase, intenta la caracterización de las propiedades mecánicas del material ante sollicitaciones externas simples y compuestas que puedan actuar sobre su estructura. En pro de la segunda fase, las propiedades obtenidas en la primera de ellas se utilizarán como punto objetivo del modelo informático mediante el cual se van a simular las mismas condiciones que en el ensayo real esperando obtener los mismo resultados para validar el modelo. De esta forma, se plantean dos nuevas líneas de trabajo, cada una perteneciente a una de estas fases.

### 4.1 Ensayos Arcan

Con el objetivo de realizar una caracterización completa del material Rohacell 71XT y de completar los datos de sus condiciones de ruptura, se definirá su curva de comportamiento plano (como lo explicado en el apartado 1.4.2). Para recoger los datos que aparecen en esta curva, se deberá realizar un análisis que cubra todo el espectro de propiedades mecánicas, tanto simples como compuestas.

Para este efecto, se realizarán los ensayos de caracterización sobre un montaje de sollicitación mixta Arcan [Ref.11]. El montaje, presentado en la figura... permite aplicar sollicitaciones de naturaleza distinta según el eje sobre el que se aplique una carga de tracción uniaxial. Este tipo de ensayo no permite la caracterización de la compresión uniaxial, sin mucha importancia, dado que se ha definido ya para este material. El Instituto no cuenta con una instalación de este tipo por lo que se deberá enviar a otro laboratorio especializado, el bloque de espuma resultante para su análisis.

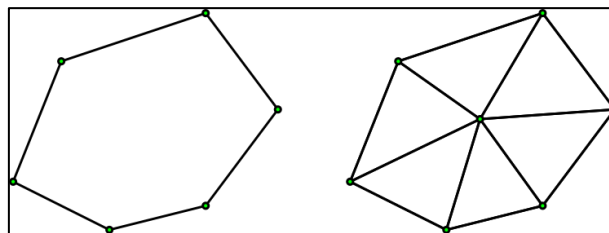


**Figura 28. Montaje Arcan multi-solicitación**

## 4.2 Mejora de la modelización a partir de modelos avanzados

La investigación alrededor de todas las áreas que giran alrededor del proyecto global, no se detienen nunca. Cuando todavía no se ha terminado de intentar representar el comportamiento de la espuma mediante la propuesta actual de elementos 1D con una estructura creada según las particiones de Voronoi, ya se está empezando a trabajar sobre un nuevo modelo que sustituya al presente en caso de que este no salga adelante.

El futuro modelo se basa en la creación de una estructura alterada a partir del mismo patrón que la presentada en la memoria, a través de las particiones de Voronoi. El cambio se producirá sobre la estructura en la fase donde las particiones todavía son elementos 1D creando celdas vacías. Cada una de las caras cerradas de estas celdas se dividirá en una composición de tetraedros, cuyo proceso de creación se muestra en la imagen 29. El otro distintivo principal en esta nueva estructura es que los elementos que se mantienen son los elementos 2D respecto a los modelos anteriores, que serán ahora elementos triangulares, donde antes permanecían los elementos 1D.

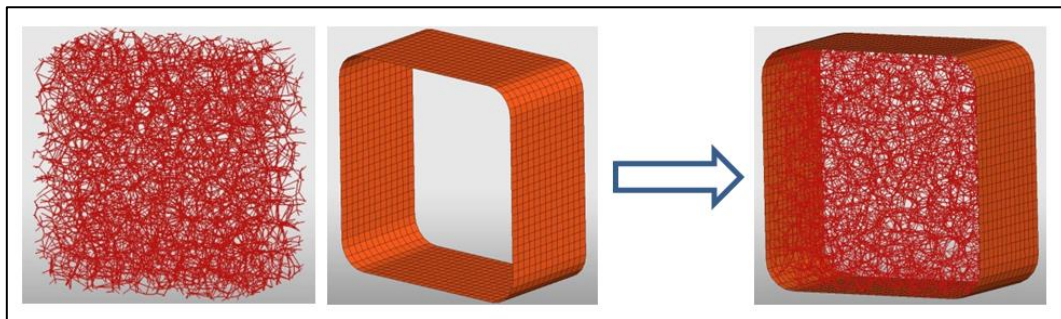


**Figura 29. Nueva división de las celdas creadas**

### 4.3 Modelo simplificado de estudio. Unión espuma-tejido compuesto

Durante todo este trabajo se ha incidido de gran forma en advertir que el objeto del estudio global al que pertenece esta memoria es el de llegar a poder reproducir completamente los ensayos dinámicos realizados sobre los diseños de palas de helicóptero del proyecto C.R.O.R.

En una primera aproximación a este cometido, a partir del modelo de espuma discreta simplificado que había sido creado en secuencias anteriores, se creó una pieza exterior mediante elementos placa 2D con el propósito de emular al tejido de material compuesto que envuelve el núcleo de espuma en los diseños presentados en este proyecto. La placa exterior emularía las propiedades de los tejidos de Aramida y fibra de carbono que aparecen en los diseños, mientras que la espuma interior deberá recoger las características de la caracterización de sus propiedades.



Composición del modelo final.

La línea de trabajo sobre este modelo se centra en la solución de la problemática de la unión de estas dos piezas, la simulación de la unión pegada núcleo-pieles. Dados los anteriores problemas sobre el modelo presentado en el apartado... ahora este factor crece, debido a que la unión actual se realizará entre elementos 1D y 2D, respecto a la anterior entre elementos 3D y 2D respectivamente.



## Otros trabajos

La gran cantidad de posibilidades que envuelven una situación de impacto requieren de una acotación de éstas en grupos diferenciados. Entre las principales características utilizadas para la clasificación de estos grupos aparecen la velocidad del impacto o la energía generada por el mismo. La presente sección se separa de todo el análisis previo que había concentrado sus esfuerzos en la caracterización de una de las partes que componen cada uno de los diseños que aparecen en el proyecto C.R.O.R. El trabajo desarrollado a partir de este punto tiene un corte totalmente experimental, en forma de realización de ensayos dinámicos en las propias instalaciones del Instituto; de forma que sean capaces de representar situaciones donde se dé el fenómeno de impacto.

Los diferentes diseños presentados en el proyecto global para la sección de las palas de helicóptero, tendrán la misma geometría exterior, mientras que la diferencia entre unos y otros residirá en su estructura interior en forma de refuerzos (paredes interiores, stitches...) y la variación de los materiales utilizados.

Lo que pretenderán este tipo de análisis, será la creación de un estudio representativo de la capacidad de absorción de cada uno de los estos modelos. De los resultados obtenidos en éstas y de las numerosas pruebas que se realizan sobre ellos, se podrá desprender un análisis comparativo a posteriori donde involucrar, no sólo los resultados obtenidos tras las experimentaciones, sino también otros aspectos, como de fabricación y económicos previos hasta que se alcanzó este punto.

### 5.1 Ensayo tiro con cañón

La absorción de energía de los diferentes diseños concebidos por el grupo de trabajo de materiales compuestos del ICA sigue siendo objeto prioritario de estudio en la imposición de cargas dinámicas sobre los prototipos.

El ensayo de tiro con cañón se engloba en el rango de impactos producidos a alta velocidad y pequeña masa, de uso no militar, según lo establecido por **[Ref.12] (apartado C del anexo)**, en su tabla de clasificación de ensayos dinámicos. Entre las situaciones más comunes que querrán ser representadas en este ensayo, se encuentran los sucesos dados en vuelo como pueden ser fragmentos de hielo atmosférico, aves o incluso pequeñas piezas de la propia aeronave impactando contra la estructura de material compuesto; así como los impactos contra el rotor de un helicóptero, dada la velocidad de giro propia de este. Por tanto, se buscará obtener la respuesta de la estructura ante un impacto donde se produce una concentración de energía de forma puntual.

### 5.1.1 Presentación del ensayo

El dispositivo utilizado en este tipo de ensayos es un cañón de aire comprimido instalado en una sala de alta seguridad habilitada para este efecto en el laboratorio, dado el riesgo que conlleva la realización de este tipo de pruebas .

Los proyectiles serán bolas de acero incrustadas en cartuchos plásticos para permitir su disparo. Por su parte, la probeta de ensayo se colocará simplemente apoyada frente a la salida del cañón con capacidad de retroceso tras el impacto. De esta forma toda la energía liberada por el proyectil se transmite a la probeta y no en parte a la bancada, debido a que el objetivo de esta experimentación es el de observar la capacidad de absorción de energía de los diseños realizados para las diferentes probetas..

Un esquema general del montaje de la estructura del ensayo queda reflejado en la figura 30.

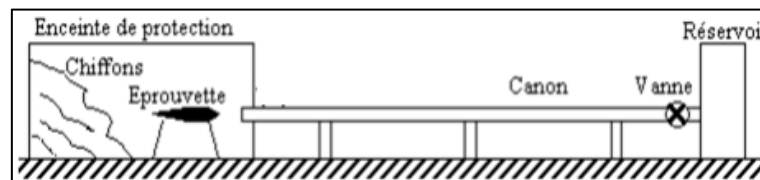
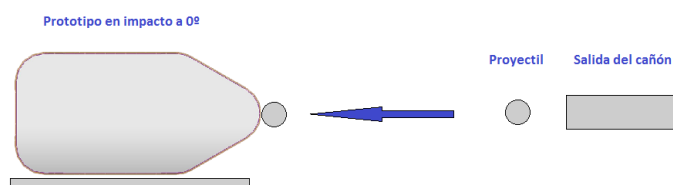
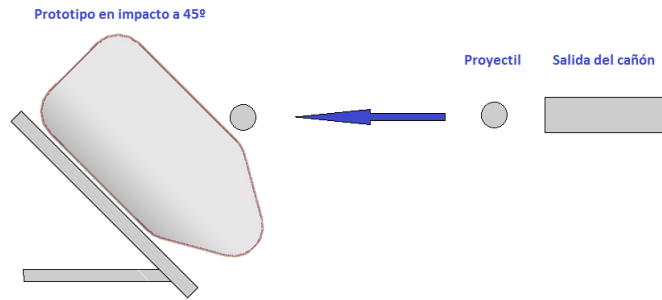


Figura 30. Esquema del montaje del ensayo "Tiro con cañón"

El trabajo de estudio que se realizará a partir de los ensayos realizados, será un balance energético entre el suceso encontrado en el inicio (energía que lleva la bala) y el suceso final (desprendimiento de la probeta, energía que esta lleva y si la bala atraviesa o no). La elección de este tipo de post-tratamiento de resultados se debe a la imposibilidad de utilizar monitorización por sensores en el momento que se realiza el ensayo, limitando el análisis a los momentos posteriores al ensayo mediante las capturas realizadas por filmación a través de cámaras de alta velocidad y al análisis tomográfico. Este último se realizará en las instalaciones especializadas de Airbus Group, dado que el Instituto no dispone del material necesario para esta realización.

Se realizarán ensayos sobre los diseños disponibles de probetas en el ICA en el momento de disponibilidad de la sala. Se efectuarán disparos con incidencia sobre el borde de ataque de la pieza colocada ésta de forma horizontal ( $0^\circ$ ) o en una de las caras de las probetas siendo el impacto de forma oblicua sobre ellas ( $45^\circ$ ). La imagen siguiente muestra la forma de proceder para ambos disparos.





**Figura 31. Colocación de las probetas de ensayo en disparos a 0 y 45º**

### 5.1.2 Instalación del ensayo

La sala de ensayado para el tiro con cañón del Instituto Clément Ader se compone de dos estancias. Una de seguridad para el control de presión y la ejecución del disparo que sólo permite la actuación de la instalación cuando toda persona se encuentra dentro de ella por motivos de seguridad. La otra es la que contiene el montaje del cañón y el recinto de seguridad donde se produce el impacto de la bala.

Se trata de un cañón de tres metros de longitud y 40 mm de diámetro interior del tubo, alimentado por aire comprimido desde el reservorio contenido en el inicio del mismo, el cual se carga a través de un compresor general.

El extremo de salida del cañón se sitúa en el interior de un recinto de protección de forma cúbica (figura 32), cuyo acceso al interior cuenta con un sistema de alarma en el caso de que alguno de los estos accesos queda abierto tras la manipulación de los elementos del interior. El mecanismo utilizado para la detención del elemento impactado se consigue literalmente con un gran montón de ropa usada, por su economía y la gran amortiguación posibilitada por el mismo.



**Figura 32. Montaje del ensayo con los cañones y la cámara de seguridad**

La recogida de datos de esta experimentación se llevará a cabo a través de la filmación mediante dos cámaras de alta velocidad FASTCAM-APX RS modelo 250 K con una frecuencia de grabación de 20000 Hz, frecuencia de obturación 50000 Hz y una resolución de 512 x 256 píxeles. La primera de ellas, se encarga de cubrir el rango de la aproximación y el impacto de la bala sobre el borde de ataque, de forma que esa imagen se utilizará para el cálculo de la velocidad de la bala antes del impacto y consecuentemente, la energía inicial del mismo. La segunda, se ocupa del área posterior de la probeta, cubriendo una posible salida del proyectil (en el caso de que éste atravesase la probeta), así como la trayectoria seguida por el espécimen tras el impacto.

El resto de detalles de la instalación se presentan en el **apartado C.1 del anexo** de este documento.

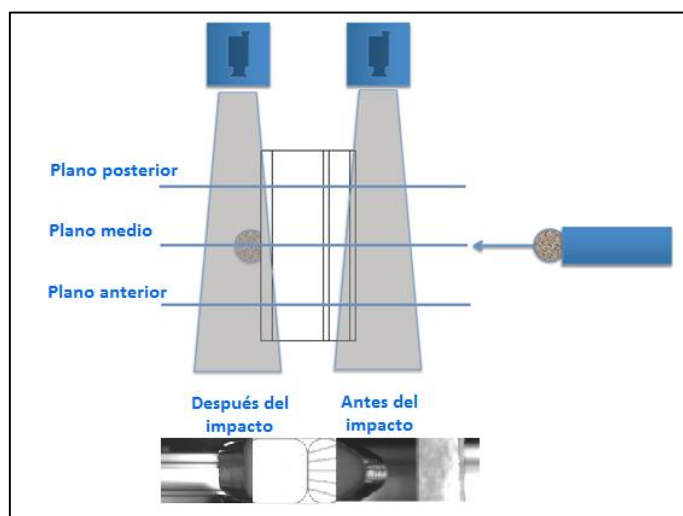


Figura 33. Disposición de cámaras de alta velocidad y planos de calibración

### 5.1.3 Preparación previa al ensayo

Presentados los elementos que forman parte de este tipo de experimentación, se procederá a la preparación previa a la realización de los ensayos. Dentro de este apartado se engloban tareas como la preparación de los proyectiles utilizados o la calibración de las cámaras.

#### Preparación de los proyectiles

Se plantea la utilización de dos tipos de proyectiles, siendo ambos balas esféricas de acero de 20 y 30 mm de diámetro, tanto en impactos sobre el borde de ataque de la probeta ( $0^\circ$ ), como si el impacto se produce de forma oblicua ( $45^\circ$ ). La diferencia de masa de los proyectiles posibilita una futura comparativa a nivel energético para altas velocidades de impacto (las cuales se sitúan en torno a los 110m/s).

Para poder proceder posteriormente al análisis de resultados mediante el método de correlación de imágenes, será necesario adaptar los proyectiles a las necesidades de este método (**apartado E del anexo**). Por tanto, se aplicará un esmaltado blanco a toda la

esfera y posteriormente un moteado en un color de contraste (en este caso el negro) sobre toda la superficie exterior.



**Figura 34. Preparación de proyectiles y resultado**

Se utilizará un cartucho de poliuretano para la estabilización del proyectil en su movimiento dentro del cañón. En el extremo del tubo, se coloca un tope desmontable que permite solo la salida de la bala, quedando bloqueando el cartucho plástico en el interior del mismo. De esta forma se consigue que el impacto sea debido únicamente a la actuación del proyectil, pero por el contrario, aparece la necesidad de desbloquear el extremo del cañón cada vez que se quiera realizar un nuevo disparo, ralentizando el proceso.

La utilización de un tamaño distinto de proyectiles, requiere una calibración distinta del nivel de presión en el cañón para que se consiga mantener un nivel de velocidad estable en todos los disparos realizados y que estará próximo a 110m/s. Para alcanzar estos valores se ajustarán los valores de disparo a unas presiones de:

Diámetro bala (mm)	Presión de disparo (bar)
20	2.0
30	2.4

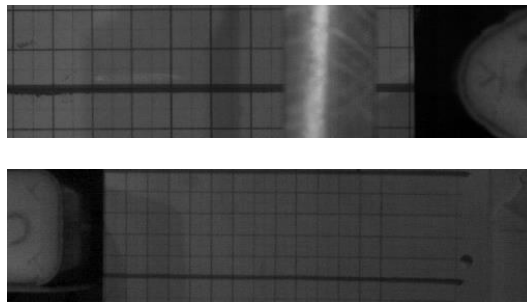
### **Preparación de las cámaras**

Como se ilustró en la figura 33, en la imagen que se obtiene a través de una cámara, hay una componente de enfoque de forma troncocónica conforme se aleja el elemento que se quiere captar del objetivo. Este hecho es debido al angular de la propia cámara. Es por ello que el proceso previo a la realización de los ensayos, se requiere de la calibración de las cámaras en diferentes puntos pertenecientes a la trayectoria de la probeta tras el impacto ya que la distancia recorrida por cada uno de ellos no se corresponderá salvo con la calibración del plano en el que se mueven esos puntos, realizada ésta en situación estática.

El plano elegido para la calibración de la trayectoria del proyectil previa al impacto será el plano medio para la cámara 1. Para ello se corresponderá la posición del plano medio de calibración de la cámara 1 con la trayectoria de la bala en su aproximación a la probeta.

Por otro lado, la parte trasera de la probeta cubierta por la cámara 2 tiene un cometido mayor, que es el de realizar el seguimiento de la trayectoria de la probeta cuando esta sale disparada tras recibir el impacto. Se toman tres planos representativos:

- Dos planos correspondientes a los extremos de la probeta, debido a la grabación lateral, si la trayectoria de la probeta es rectilínea, se facilitará la medida de la velocidad lineal de esta como media de ambos extremos. En caso de que exista rotación tras el impacto, se podrá comparar el desplazamiento de los puntos de ambos extremos para calcular también la velocidad de rotación del espécimen (sobre todo en impactos oblicuos).
- El plano central tendrá la función de posibilitar la medición de la velocidad de salida del proyectil. Este mismo plano, será al cual quede referenciado la velocidad media tras el tratamiento de los resultados.

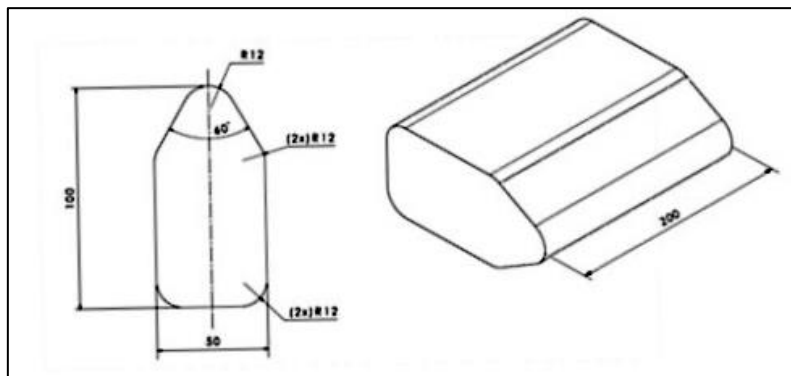


**Figura 35. Calibración de los planos medios anterior y posterior**

#### **5.1.4 Material ensayado y recuperación de resultados**

Los prototipos utilizados para el ensayo comparten dimensiones de sección transversal con otros ensayos de esta temática (Crushing), creando probetas de 200mm de longitud (figura 36) sobre las que se producirá el impacto de la bala.

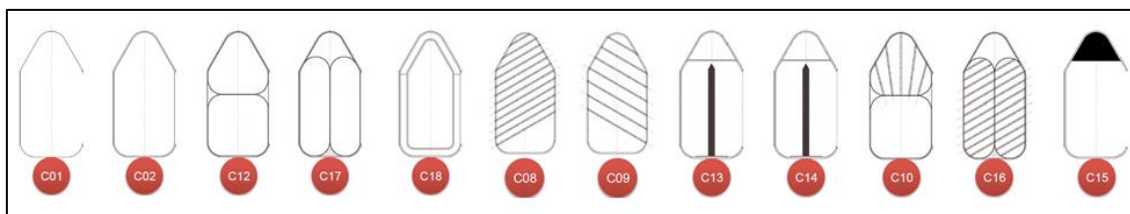
Se realizarán un total de más de 25 ensayos de disparo que tendrán lugar en dos tandas de ensayos, correspondientes a dos días de trabajo para cada una de ellas y a una posición de disparo (0 o 45°), debido a la limitación en la velocidad de realización de los ensayos y la utilización de la sala, compartida por otros grupos de trabajo en el propio instituto Clément Ader. Otro factor limitante respecto a estas fechas, es la disponibilidad de los prototipos, ceñido a la recepción de los envíos del fabricante de estos (Airbus group).



**Figura 36. Dimensiones probeta de ensayo de tiro con cañón**

El alto coste de fabricación de las probetas de experimentación y su complejidad, hacen que se reduzca el número de ensayos posibles sobre cada diseño, imponiendo la necesidad de que todo ensayo deba ser revisado minuciosamente para no fallar en la consecución del mismo y que sea necesaria su repetición.

Los diseños realizados en el seno del grupo de trabajo del proyecto se encuentran a continuación bajo la notación dada por el propio fabricante, Airbus, dentro del laboratorio se utiliza una notación distinta para denominar a cada una de ellas que deberá mantenerse bajo estricta confidencialidad.



**Figura 37. Diseños de sección de pala de helicóptero**

El análisis que se puede llevar a cabo con la realización de este ensayo es limitado, dada la imposibilidad de monitorizar la respuesta de cada una de las probetas mediante sensores a lo largo del ensayo. La valoración posterior a este tipo de ensayos se puede realizar mediante dos vías:

La primera, se referirá a las imágenes filmadas mediante las cámaras de alta velocidad, de manera que pueda realizar un análisis energético entre los sucesos previo y posterior al impacto del proyectil sobre la probeta. El factor que se extraerá de este estudio es la capacidad de absorción de energía de cada uno de los diseños ensayados.

La segunda, será realizada en las propias instalaciones de Airbus Group donde se dispone de la tecnología necesaria para la realización de análisis tomográficos sobre las probetas para poder observar los efectos causados por el proyectil en el interior de la probeta sin estar obligados a la destrucción de la misma para la consecución de este efecto.

Los prototipos ensayados deben ser registrados, debido a que una vez enviados para la realización del análisis tomográfico, estos no volverán a los dominios del Instituto. Por tanto se realiza un reportaje fotográfico de todos los diseños ensayados de forma que se pueda tener adicionalmente acceso a los resultados de forma visual. Algunos ejemplos de este reportaje se muestran en la parte final de este anexo.

### **5.1.5 Análisis energético**

El registro de imágenes a partir de las dos cámaras de alta velocidad es la fuente principal de información, a la cual se tiene acceso, referente a este ensayo. La variable de interés será el cálculo de la velocidad tanto de la bala en la entrada como en una posible salida tras atravesar la probeta; así como la velocidad de ésta tras recibir el impacto. A partir de estos datos, se efectuarán el resto cálculos a través del análisis energético.

El análisis de los resultados contempla dos objetivos tras su consecución. El primero de ellos (y principal), será la realización del cálculo manual de las velocidades, tanto de la primera como de la segunda cámara, por medio de la medición directa sobre las imágenes recogidas por este aparato. Para ello utilizará un software de edición de imágenes que permite realizar este tipo de acciones.

El segundo en cambio, se sirve de la utilización de un software de correlación digital de imágenes (DIC) para el análisis único de la trayectoria de la bala en su aproximación a la probeta de ensayo. Este programa se basa en el código realizado por un investigador del propio ICA relativamente reciente. El objetivo, por tanto, además del cálculo de velocidad del primer tramo de estudio, será la comprobación de la fiabilidad del software mediante su comparación con el cálculo manual. Por desgracia, dado que el programa sigue en fase de ajuste, no podrán mostrarse los resultados de esta comparativa.

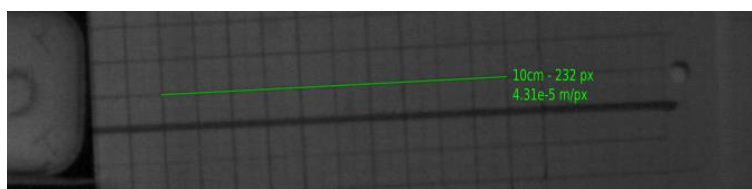
**La información ampliada de este método de correlación de imágenes (DIC) se encuentra en la sección E del anexo.**

### **Método manual**

Contempla la utilización de imágenes captadas por las cámaras de alta velocidad, las cuales serán introducidas en un software de edición de imágenes para la medida directa del cambio de posición del elemento de estudio entre imágenes sabiendo que estas tienen una correspondencia temporal.

El software de edición utilizado para las medidas realizadas sobre las imágenes será Adobe Illustrator. El procedimiento que se establece para este trabajo será el de la comparación de las imágenes de la calibración efectuada sobre los planos representativos en ambas cámaras, con las imágenes registradas por la cámara de alta velocidad. Se debe tener en cuenta que las mediciones realizadas a través de este método incurrirán en un error sistemático proveniente tanto del ojo humano en el ajuste de la medida como del propio software por medio del ajuste manual del punto que se realiza la medición.

La calibración realizada sobre cada una de las cámaras, permite la definición de un factor de conversión de la medida utilizada por el software de edición (en Pixels) a la medida representativa para el cálculo de velocidades (metros). Cada día de ensayo exige una nueva calibración con los correspondientes cambios de valores para estos factores de conversión.



**Figura 38. Calibración de la cámara 2 en su plano anterior y factor de conversión (m/px)**



## Cálculo de energías

Las ecuaciones que se utilizarán para el cálculo de energías se encuentran representadas en el **apartado C3.2 del anexo**. Cabe destacar que, dado que el criterio de comparación elegido entre los diferentes diseños será el de la capacidad de absorción de energía que puede ofrecer cada uno de ellos, se considerará como un factor representativo de este efecto, la tasa de absorción de energía de cada uno de ellos.

$$\gamma = \frac{\Delta E}{E_0}$$

Se trata por tanto de un ratio negativo donde un menor valor del mismo (más próximo a -1) indica una menor absorción de energía, por la definición del ratio y el balance de energías. **Cuanto mayor sea la energía que lleve la probeta en su vuelo, peor será la disipación.**

## Método manual. Caso tiro horizontal.

El caso de estudio referente al tiro horizontal es a priori el más sencillo de todos. La probeta se colocará frente a la salida del cañón a gas, de manera que el proyectil impacte sobre el propio borde de ataque (figura 31).

El primer paso, común a los dos casos, es la revisión de imágenes para la comprobación de si el registro es correcto y para realizar un primer análisis de la situación (la bala atraviesa la probeta, hay cierto desvío en la trayectoria de la probeta...).

Seguidamente, se realizará la medición de los desplazamientos de las piezas en los distintos instantes temporales fotografiados a través del software de edición. El procedimiento que se seguirá se basa en la superposición de imágenes y la medición directa sobre este montaje. En la figura. 39 se muestra un ejemplo de medición sobre un montaje fotográfico.

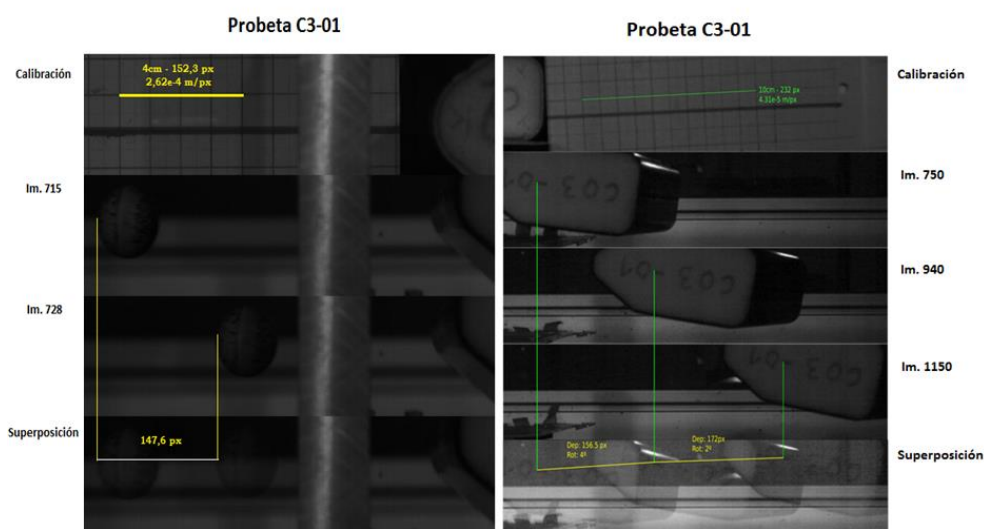


Figura 39. Ejemplo de cálculo de desplazamientos para la probeta C3-01

Conocido el valor de registro de imágenes de la cámara de alta velocidad a una tasa de 36000 imágenes/segundo, se obtendrá un factor de correlación temporal fijo en todos los ensayos para el cálculo de la velocidad. Se aplicará la fórmula (1) en cálculos para trayectorias rectilíneas sencillas como serán todas aquellas que conciernen al desplazamiento inicial de la bala (cálculo de la velocidad inicial de la misma), así como para trayectorias de probetas donde estas salgan despedidas en una proyección paralela al suelo (tiro horizontal generalmente).

$$V_{media} = \alpha \frac{Distancia}{\Delta t \cdot \Delta_{Imagen}} \quad (1)$$

Siendo la distancia medida en pixeles,  $\alpha$  el factor de conversión para la distancia en m/pixel,  $\Delta t$  la tasa de cambio en s/imagen y  $\Delta_{Imagen}$  el número de imágenes comprendido entre cada una de las mediciones.

Los resultados de medida de velocidad se muestran en la siguiente tabla, resumen de la que se contempla al final de este anexo. Tras la observación de las imágenes, se concluye que la probeta apenas tiene rotación en su salida por lo que se considerará solamente la componente horizontal de velocidad de esta.

**Tabla 10. Resumen resultados del cálculo de velocidad. Caso tiro horizontal**

TABLA RESUMEN											
Ensayo		B1-07	B2-07	B3-07	C1-07	C2-07	C3-07	C4-08	C6-08	C4-07	C6-07
<b>Velocidad (m/s)</b>											
Bala	Entrada	109,955	109,852	109,363	108,266	112,843	110,690	112,843	111,920	108,538	110,690
	Salida										32,349
Probeta		38,851	41,815	43,554	41,788	40,980	41,538	42,266	31,073	18,347	14,439

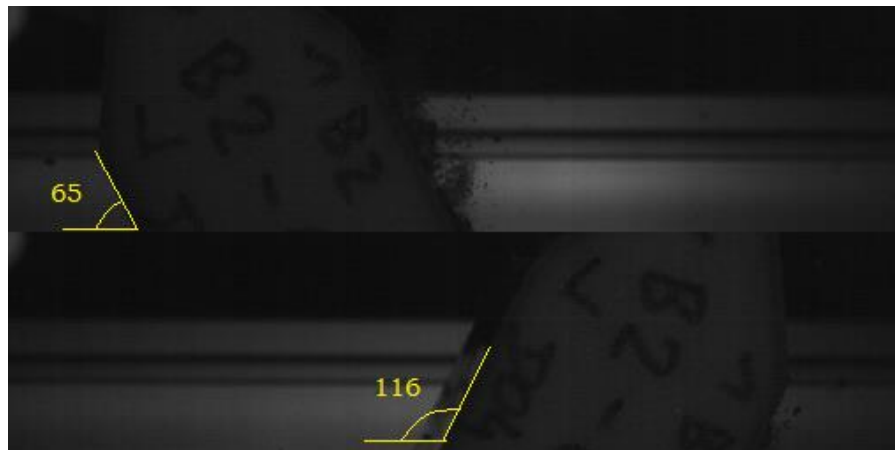
### Método manual. Caso tiro horizontal.

Este caso, diferente al anterior, tiene su particularidad en la colocación de la probeta frente a la salida del cañón. El espécimen del ensayo se coloca en posición inclinada con un ángulo de 45° (figura 31), de forma que el impacto se reciba en una de las caras laterales del prototipo, lo que añadirá una componente de giro a la trayectoria de salida de la probeta.

El método de cálculo que se seguirá es exactamente igual al anterior, mediante la utilización del software de edición. En cambio, ahora se debe tener en cuenta que a la probeta se le imprime una rotación por lo que aparecerá una nueva componente energética debida a esta rotación de la pieza. La componente de velocidad en este momento no se referirá únicamente a uno de los ejes, sino que aparecerán componentes de la velocidad, tanto horizontal como vertical. Estas dos componentes se calcularán según la fórmula anteriormente mostrada (1) para trayectorias rectilíneas. Por otro lado, la aportación de la velocidad de rotación se define a partir de la siguiente ecuación (2):

$$\omega = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\Delta t \cdot \Delta_{Imagen}} \quad (2)$$

Siendo  $\theta$  el ángulo rotado por la probeta. Las mediciones por tanto, se realizarán en grados ( $^{\circ}$ ) y la velocidad de rotación en unidades del SI ( $s^{-1}$ ).



**Figura 40. Ejemplo del proceso de medida del ángulo girado por la probeta B2-06**

Los resultados de medida de velocidad se muestran en la siguiente tabla, resumen de la que se contempla al final de este anexo.

**Tabla 11. Resumen resultados del cálculo de velocidad. Caso tiro oblicuo**

TABLA RESUMEN									
ESSAI		B1-06	B2-06	B3-06	C1-06	C2-06	C3-06	C4-06	C6-06
<b>Velocidad (m/s)</b>									
Bala	Entrada	108,689	113,251	111,301	107,528	109,357	108,788	115,174	107,888
	Salida							30,250	
Probeta (por componentes)	Horizontal	19,677	24,071	29,326	21,454	0,000	0,000	17,329	0,000
	Vertical	2,213	4,972	0,000	0,472	5,260	0,464	2,114	4,083
	Módulo	19,801	24,579	29,326	21,459	24,569	28,228	17,458	23,901
<b>Velocidad de rotación(rad/s)</b>									
		218,853	273,882	234,079453	206,628	269,279	293,215	231,692	246,091425

### 5.1.6 Resumen de resultados

El último escollo en el proceso de post-tratamiento de resultados corresponde al cálculo de energías a partir de los datos de velocidades que se han sustraído del análisis de las imágenes. Para ello, basándose en las ecuaciones que aparecen en el apartado ... del anexo para el cálculo de energías se podrá realizar una estimación de la energía absorbida por cada uno de los diseños, objetivo principal del estudio que se está realizando.

Para el caso de las experimentaciones de tiro horizontal:

**Tabla 12. Resumen resultados del cálculo energético. Caso horizontal**

TIRO HORIZONTAL											
Ensayo		B1-07	B2-07	B3-07	C1-07	C2-07	C3-07	C4-08	C6-08	C4-07	C6-07
<b>Velocidad (m/s)</b>											
Bala	Entrada	109,955	109,852	109,363	108,266	112,843	110,690	112,843	111,920	108,538	110,690
	Salida										32,349
Probeta		38,851	41,815	43,554	41,788	40,980	41,538	42,266	31,073	18,347	14,439
<b>Energía cinética (J)</b>											
Bala		671,002	669,742	663,791	650,546	706,708	680,006	706,708	695,201	194,378	202,164
Probeta		239,998	257,906	281,701	265,429	247,710	257,081	263,500	140,485	47,970	18,658
<b>Energía absorbida (J)</b>		-431,005	-411,836	-382,089	-385,116	-458,998	-422,926	-443,208	-554,716	-146,409	-183,506
<b>Tasa de absorción de energía</b>		-0,642	-0,615	-0,576	-0,592	-0,649	-0,622	-0,627	-0,798	-0,753	-0,908

Tabla....

Para el caso de las probetas C4-07 y C6-07 se utilizó balas de 20 mm de diámetro y masa mucho menor al resto de 30mm. De ahí la diferencia en los valores energéticos obtenidos.

Para el caso de tiro oblicuo, en cambio, entra en juego la componente de velocidad de rotación de la probeta tras el impacto de la bala.

**Tabla 13. Resumen resultados del cálculo energético. Caso oblicuo**

<b>TIRO OBLICUO</b>									
<b>ENSAYO</b>		<b>B1-06</b>	<b>B2-06</b>	<b>B3-06</b>	<b>C1-06</b>	<b>C2-06</b>	<b>C3-06</b>	<b>C4-06</b>	<b>C6-06</b>
<b>Velocidad (m/s)</b>									
Bala	Entrada	108,689	113,251	111,301	107,528	109,357	108,788	115,174	107,888
	Salida							30,250	
Probeta (por componentes)	Horizontal	19,677	24,071	29,326	21,454	0,000	0,000	17,329	0,000
	Vertical	2,213	4,972	0,000	0,472	5,260	0,464	2,114	4,083
	Módulo	19,801	24,579	29,326	21,459	24,569	28,228	17,458	23,901
<b>Velocidad de rotación(rad/s)</b>									
		218,853	273,882	234,079453	206,628	269,279	293,215	231,692	246,091
<b>Energía cin. de rotación (J)</b>									
		5,730	8,314	5,975	4,896	7,988	9,683	5,068	6,762
<b>Energía cinética (J)</b>									
Bala		655,642	711,827	687,533	641,711	663,727	656,828	736,204	646,007
Probeta		61,361	91,225	398,629	75,520	89,339	119,924	77,302	83,687
<b>Energía absorbida (J)</b>		-594,281	-620,602	-288,904	-566,190	-574,389	-536,905	-658,902	-562,320
<b>Tasa de absorción de energía</b>		-0,906	-0,872	-0,420	-0,882	-0,865	-0,817	-0,895	-0,870

Un valor más negativo en la tasa de absorción de energía implica una peor disipación, contrariamente a lo buscado en este estudio. A través de los resultados indicados en rojo, uno se puede hacer a la idea de los diseños mejor valorados partiendo como resultado negativo aquellos a los que la bala es capaz de atravesar.

### 5.1.7 Análisis tomográfico

La tomografía axial computerizada (TAC) [Ref.19], es una técnica que permite el análisis no destructivo de piezas y materiales a través de su sección transversal. El haz de energía utilizado para la proyección (habitualmente de Rayos X) y el detector están en el mismo plano que la superficie de la que se desea obtener la imagen. La señal del detector se obtiene mientras la muestra gira en el eje perpendicular al plano considerado. Mediante un procedimiento de cómputo se calcula y representa la atenuación relativa de la energía del haz que pasa a través de las estructuras de la sección delgada de la pieza. La imagen de Tomografía Computerizada (TC) representa punto a punto los coeficientes de atenuación lineal en la sección, que dependen de la densidad del material, del número atómico efectivo del material y de la energía del haz de rayos X. Posteriormente, estas imágenes de TC pueden ser procesadas mediante programas de análisis de imagen plana o tridimensional. Se puede utilizar un conjunto de imágenes de TC para caracterizar el volumen de la pieza, geometría, porosidad, fases materiales, grietas...

El análisis tomográfico, se contempla como la última etapa del proceso de ensayo de tiro con cañón sobre los diferentes prototipos de los diseños de pala que se dispone. Este sistema permitirá observar las consecuencias del paso de la bala por el interior de la probeta sin tener que incurrir en la destrucción de esta para acceder a ese tipo de información. El Instituto Clément Ader no dispone de esa tecnología en sus instalaciones, por lo que todas las probetas son enviadas a las instalaciones de Airbus Group donde se realizarán las tareas de análisis tomográfico.

Algunas de las espectaculares imágenes que pueden obtenerse tras este análisis se muestran a continuación. Se trata de especímenes ensayados anteriormente en el propio laboratorio, ya que se trata de un proceso costoso y por lo tanto lento en la obtención de resultados.

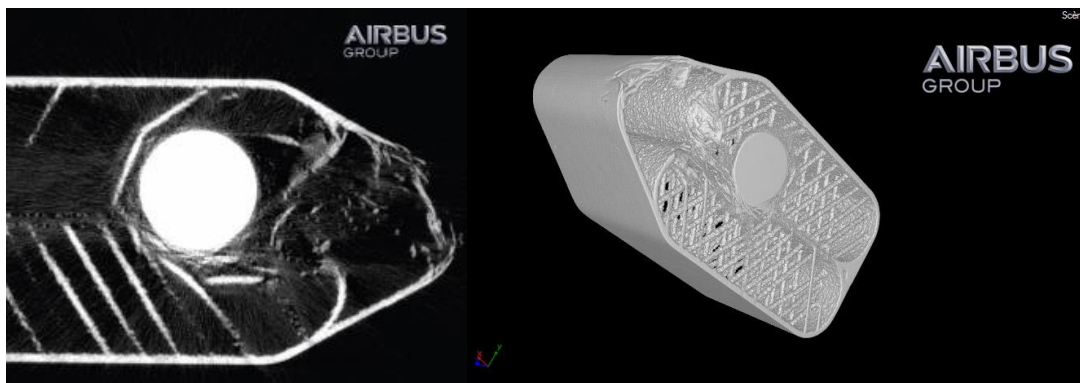


Figura 41. Tomografía de una bala en el interior de una C16 tras tiro horizontal

## 5.2 Ensayo de Crushing

La presente sección se ocupará de la presentación de una nueva experimentación en la que se participó activamente durante la estancia en el ICA. Se trata de una tipología de ensayo diferente frente a la anterior ya que no se trata de la concentración de energía en un punto, pero comparte argumento con el tiro a cañón, la capacidad de absorción de la energía procedente de un impacto.

Este ensayo se denomina de Crushing y junto con el de caída de peso representan el grupo de ensayos comprendidos en el rango de bajas. Ambos comparten metodología de ensayo, siendo la gravedad el motor de la experimentación en ambos casos. La diferencia estiba en la geometría del impactador (figura 42), siendo de menor tamaño el utilizado en las pruebas de caída de peso buscando realizar una indentación sobre el espécimen; mientras que el impactador del ensayo de Crushing, de mayor tamaño, busca es el colapso total de la estructura. El cartucho, que también se muestra en la figura inferior es común a ambos ensayos.

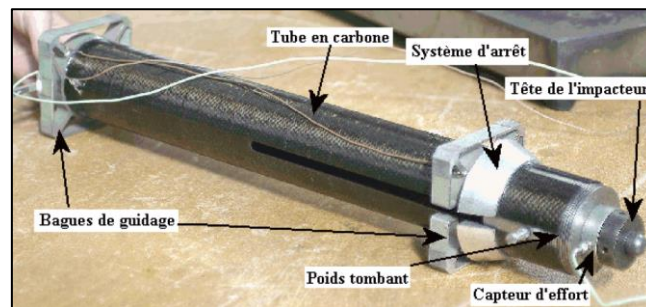


Figura 42. Impactador para el ensayo de caída de peso [Ref.13]

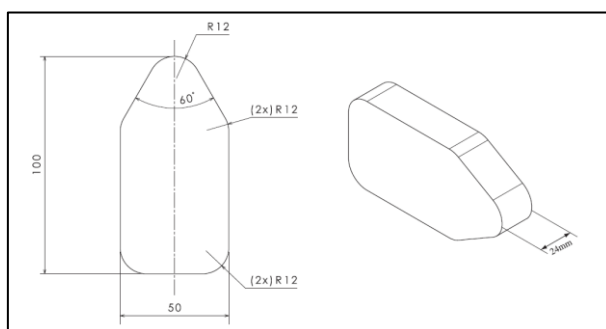
### 5.2.1 Presentación del ensayo

Las dimensiones geométricas exteriores de las probetas son las mismas para todas las tipologías de experimentación ante una sollicitación de impacto, en cambio, el espesor de estas se varía de forma que se adapte a las características de cada uno de los ensayo. Las dimensiones de los especímenes que formarán este ensayo se muestran en la figura 43.

Para la realización final de un análisis energético, se partirá de los datos obtenidos de la fuerza que realiza el indentador plano durante el colapso de la probeta. El ensayo de Crushing se basa en la utilización de la energía potencial como medio para la transmisión de energía al cuerpo que posteriormente realizará el impacto sobre la pieza a ensayar. El elemento que producirá este efecto es una masa colocada sobre un carril de lanzamiento situado en el interior de una torreta vertical cuya masa es conocida. La torreta está calibrada, de modo que puede conocerse la altura a la que se coloca inicialmente el peso, por tanto la energía potencial de la masa que será capaz de transformarse posteriormente en energía cinética. El objetivo principal de esta masa no es otro que el colapso total de la estructura de estudio, mientras que esta debe absorber la mayor cantidad de energía posible sin mostrar una rigidez excesiva que se denotará en un pico enorme de carga tras el impacto que tendría que se transmitiría al rotor con los problemas que podría conllevar.

El registro de la fuerza generada por el impacto, se realizará por medio de un captador situado sobre el propio indentador plano. Por otro lado, se colocará una cámara de alta velocidad con su propio registro de imágenes del movimiento de ambas partes a una frecuencia de grabación que se corresponda con la del registro del captor de fuerza. De esta forma se podrá establecer una relación de correspondencia entre ambas informaciones a la hora de efectuar futuros análisis.

Las imágenes recogidas por la cámara de alta velocidad serán filtradas a través de un software informático de correlación de imágenes (**DIC, apartado E del anexo**), el cual es capaz de identificar realizar el seguimiento del indentador durante su recorrido final, permitiendo así el registro de su desplazamiento, el cálculo de velocidades y en consecuencia el cálculo energético previo al impacto.



**Figura 43. Dimensiones especímenes Crushing**

A partir de toda la información recogida, se posibilita la realización de un análisis comparativo entre los diferentes modelos a través de su respuesta presentada sobre un gráfico fuerza-desplazamiento.

### **5.2.2 Instalación del ensayo**

Para la realización de esta experimentación, el laboratorio del ICA cuenta con una estructura vertical de una longitud de 5m por la que se deslizará el impactador hasta golpear la probeta en la parte inferior de la misma (figura 44).

Por su parte, se estableció que el impacto se producirá a través de un indentador plano (visto en la figura 46) de masa 4 kg a una velocidad en torno a 6.5 m/s (de ahí la definición de baja velocidad, baja energía). Dado velocidad de impacto se alcanza por medio de la gravedad únicamente, estableciendo una altura de caída libre de 2.15 m que a su vez servirá como referencia de cálculo energético.

La recogida de datos se realiza a través de dos fuentes ya presentadas. La primera de ellas se trata de un captor de fuerza conectado de forma directa al impactador. Se trata de un sensor SCAIME modelo K100 (50 kN de corte) que registrará su actividad sobre un osciloscopio a una frecuencia de muestreo de 20000 Hz. La segunda de las fuentes, será una cámara de alta velocidad FASTCAM-APX RS modelo 250 K con una frecuencia de grabación de 20000 Hz, frecuencia de obturación 50000 Hz y una resolución de 512 x 256 píxeles. La alta velocidad de grabación y la baja resolución de la cámara consecuencia de la primera característica,



requerirán de iluminación externa de la escena a través de spots de alta potencia apuntando directamente al elemento que se registra, la probeta.



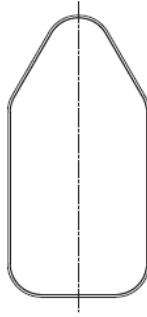
Figura 44. Imagen de la torreta de caída libre

### 5.2.3 Resultados

A continuación se presentarán varios de los ensayos de esta tipología, equivalentes a aquellos sobre los que se tuvo influencia durante la estancia en el ICA con protagonismo en la fase de experimentación y recogida de datos de este ensayo, no así en el análisis posterior de los resultados. Las pruebas fueron realizadas sobre diferentes prototipos de los diseños del proyecto C.R.O.R. y en el presente apartado se recoge los resultados registrados a partir de esta experimentación. Como se podrá ver a continuación, este estudio tiene un trabajo previo ya realizado que se muestra en el artículo: *Experimental study of impact energy absorption by reinforced braided composite structures: Dynamic crushing tests* [Ref.14]. Los modelos presentados a continuación servirán, además de para conocer mejor la metodología de ensayo, para introducirse en los diseños que aparecen en el seno de este proyecto, los materiales que los componen y cuáles son las variaciones investigadas de éstos en busca de su optimización.

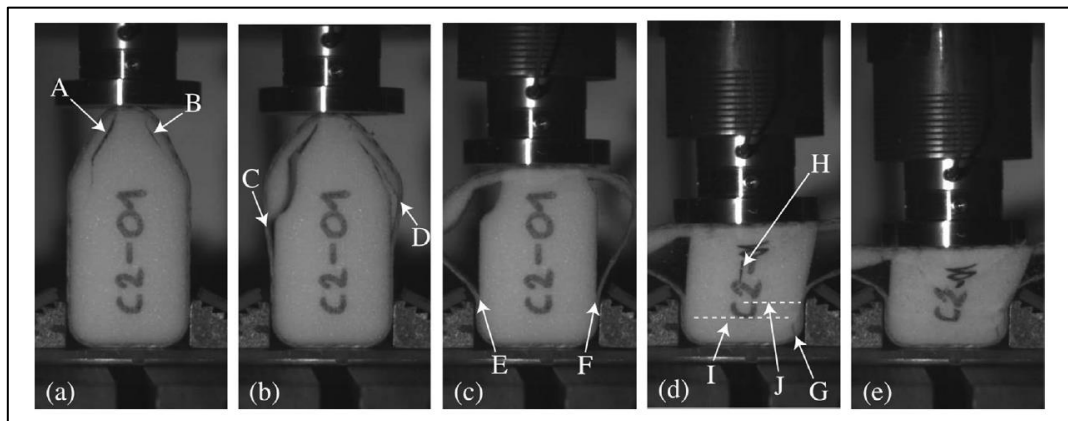
#### Modelo de referencia

Se considera como el diseño más simple de todos por su composición a partir de un núcleo de espuma realizado en una sola pieza de espuma de polimetacrilimida Rohacell 71XT, envuelto mediante una piel de tres capas de material compuesto creado a través del braiding-2D con fibra de Aramida 12K orientada a  $\pm 45^\circ$  sobre una matriz inyectada de resina HexFlow RTM6 y la inexistencia de refuerzos interiores.



**Figura 45. Sección modelo D1 o de referencia**

El proceso del ensayo recogido a través de la cámara de alta velocidad se muestra a continuación acompañado de una serie de referencias indicativas de la evolución del colapso de la probeta para que puedan ser identificadas tanto en el gráfico fuerza-desplazamiento (directamente obtenidos de los captadores) como en el contiguo de energía desplazamiento. Todos los ensayos realizados se grafican respecto a los valores obtenidos para el modelo de referencia (normalización de resultados).



**Figura 46. Colapso del diseño C2-01 (modelo D1)**

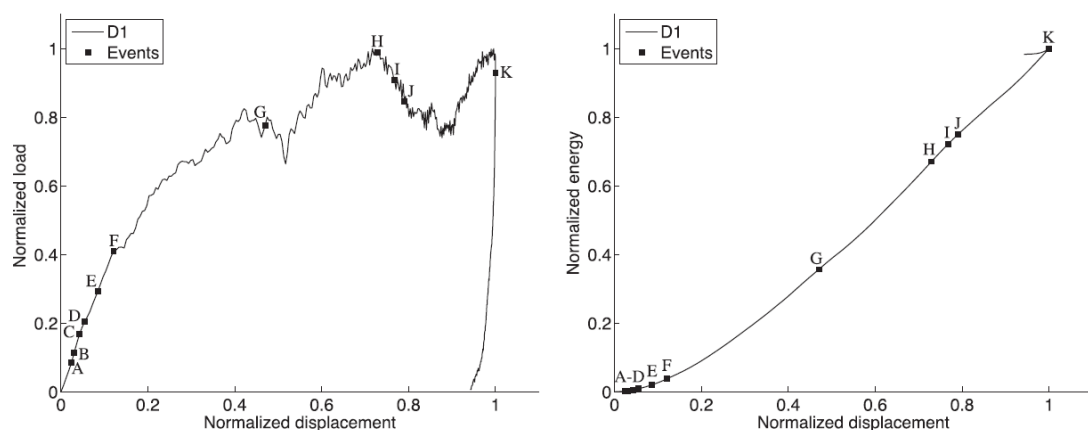


Gráfico... Respuesta carga-desplazamiento y energía-desplazamiento para el modelo D1

Otros modelos sobre los que se realiza esta experimentación y su comparación con el modelo de referencia se muestran en el **apartado D del anexo**.

## Conclusiones generales

El presente documento ha intentado introducir al lector en la tarea que está desempeñando el departamento de mecánica y materiales compuestos del Instituto Clément Ader en la ciudad francesa de Toulouse. En colaboración con la empresa Airbus helicopters se trabaja en el diseño de un nuevo concepto de pala de rotor de un helicóptero fabricada únicamente mediante materiales compuestos.

La aportación de este trabajo tenía el nada fácil objetivo de adaptarse a un proyecto con varios años de avance, un equipo formado y algunos otros compañeros con situaciones parecidas a la de uno mismo.

Se ha revisado de forma muy breve los trabajos en los que se basarían las secciones presentes en este trabajo; se ha participado en procesos de experimentación en la temática de impacto de estructuras de material compuesto en las instalaciones del laboratorio del Instituto; así como se han realizado análisis de los resultados recogidos en los ensayos precedentes. Por otro lado se ha planteado la realización de un nuevo modelo virtual discreto de la espuma Rohacell® que sustituyera al ya existente y se ha caracterizado su ensayo de compresión obteniendo resultados prometedores en cuanto a la modelización de su respuesta ante este ensayo.

Considerando los objetivos planteados en la sección 1 de este mismo escrito, se podrá destacar la rápida integración en el equipo de trabajo, en la normativa de realización de ensayos y de seguridad en el laboratorio. La participación en los ensayos fue un éxito y la labor de análisis de los resultados posteriores de gran utilidad. La finalización de la estancia en la empresa impidió que se conocieran los resultados de las comparativas que se desprenden de estos análisis.

Respecto a la parte más ambiciosa y difícil de este estudio, la modelización de la espuma; se consiguió caracterizar la propiedad mecánica del material real ante una sollicitación externa de compresión. Teniendo en cuenta la dispersión de los ensayos obtenidos se tuvo que aparcar la realización de nuevos ensayos por falta de tiempo y quedarse con los valores medios obviando aquellos que mostraban un comportamiento incongruente. A pesar de todo, los resultados obtenidos eran de gran calidad y representaban fielmente el comportamiento de este tipo de materiales. Por otro lado, la modelización computacional de este material pasó por fases iniciales muy lentas donde no se conseguía ningún tipo de avance hasta que se dio con la fórmula correcta. Los últimos modelos realizados se presentaron al final de la estancia en la empresa, siendo estos los más cercanos obtenidos hasta la fecha sin conseguir representar completamente la curva de respuesta ante este ensayo. Sin embargo, todo el trabajo previo sirvió para establecer las bases de la influencia de cada uno de los elementos que participan en la definición de los elementos 1D Spring-Beam, de manera que se podría seguir trabajando en una aproximación más fiel en todos los modelos de diferentes densidades de malla creados.

La obtención de los modelos de una densidad de mallado superior a la del utilizado para el estudio y la consecución de un principio de relación de parámetros entre ambas estructuras servirá para paliar el problema de no haber conseguido un modelo perfecto y anima a continuar el estudio sobre esta parte dada la posibilidad de extrapolar los resultados hacia modelos superiores.

Como experiencia personal me gustaría destacar la gran suerte que considero que he tenido pudiendo realizar este proyecto en una institución dedicada a la investigación y sobre todo en un país extranjero. Además de introducirme de lleno en la cultura francesa, he podido observar sus métodos de trabajo, disfrutar del ambiente formal y de la libertad en cuanto a labor individual que te permite tener un trabajo como el de investigador; pero el mayor beneficio es el de haber conocido a un gran grupo de mentes brillantes y conseguir introducirme al ritmo de este tipo de mundo laboral. A pesar de las grandes dificultades iniciales de este trabajo, considero muy gratificante el resultado y el hecho de que esta aportación sirva como punto de partida a un futuro compañero.



## Referencias

- [1] Davies G.A.O., Olsson R. Impact on composite structures, The Aeronautical Journal, vol. 108, p. 541-563, (2004).
- [2] Q.M. Li, R.A.W. Mines, R.S. Birch. The crush behaviour of Rohacell-51WF structural foam. Impact Research Centre, Department of Engineering, University of Liverpool, (1999).
- [3] S. Arezoo, V. L. Tagarielli, N. Petrinic, J. M. Reed. The mechanical response of Rohacell foams at different length scales.
- [4] P. López Negro. Caractérisation de la fracture des structures sandwich endommagées dans l'interface peau-mousse. Modélisation de la mousse Rohacell 51A. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio.
- [5] J. Aubry. Thèse, Etude expérimentale et numérique d'impacts sur structures : application aux pales d'hélicoptères. Université Toulouse 3 Paul Sabatier (2013).
- [6] J. Aubry<sup>1</sup>, P. Navarro<sup>1</sup>, S. Marguet<sup>1</sup>, J.-F. Ferrero<sup>1</sup>, O. Dorival<sup>2</sup>, L. Sohier and J.-Y. Cognard. Change of Scale Strategy for the Microstructural Modelling of Polymeric Rohacell Foams.
- [7] ISO 844 – Rigid cellular plastics. Determination of compression properties (2007)  
ASTM D 1621 – Standard test method for compressive properties of rigid cellular plastics (2000)  
ISO 527 – Plastics. General principles for the determination of tensile properties (1996)  
ASTM D 638 - Standard test method for tensile properties of plastics (2002)
- [8] P. Navarro, J. Aubry, S. Marguet, J.-F. Ferrero, S. Lemaire and P. Rauch. Experimental and numerical study of oblique impact on woven composite sandwich structure : Influence of the firing axis orientation. Composite Structures. 94(6)1967-1972. 2012
- [9] F.Grennerat, O.Castelnau, M. Montagnat. Hétérogénéités de déformation au cours du fluage transitoire de la glace polycristalline. Université de Grenoble. (2006)
- [10] O. Dorival, A. V. Metrikine, A. Simone. A lattice model to simulate ice-structure interaction. Department of Structural Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology. (2014)
- [11] M. Arcan, Z. Hashin, A. Voloshin. A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials. Experimental Mechanics 18,141-146. (1978)
- [12] B.Ostre. Etude des impacts sur chant appliquées à des structures composites dans l'aéronautique. Thèse de doctorat, Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace (ISAE) de Toulouse

- [13] S.Rivallant. Modélisation à l'impact de pales d'hélicoptères. École nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace. (2003)
- [14] O. Dorival, P. Navarro, S. Marguet, C. Petiot, M. Bermudez, D. Mesnage, J.-F. Ferrero. Experimental study of impact energy absorption by reinforced braided composite structures: Dynamic crushing tests
- [15] A. Okabe, B. Boots, K. Sugihara, S. N. Chiu. Spatial tessellations: concepts and algorithms of Voronoï diagrams. J. Wiley & Sons, Chichester(2000).
- [16] Block Format Reference Guide. Radioss 10.0. Altair Engineering, Inc. (2009)
- [17] RADIOSS THEORY MANUAL 10.0 version. Large Displacement Finite Element Analysis (2009) – Part 1 and 2.
- [18] Jean-Charles Passieux, Pablo Navarro, Jean-Noel Périé, Steven Marguet, Jean-Francois Ferrero. A digital image correlation method for tracking planar motions of rigid spheres: application to medium velocity impacts
- [19] P. M. Bravo, J. M. Alegre, I. I. Cuesta, M. Preciado. Aplicación de la tomografía axial computerizada al estudio de materiales y piezas fabricadas. Departamento de Ingeniería Civil, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Burgos, Spain

